

냉동사이클의 고성능 퍼지제어를 위한 설계 인자들의 영향 분석

Analysis of Design Factors for High Performance Fuzzy Logic Control of Refrigeration Cycle

최성운* · 정석권*† · 양주호**

Sung-Woon Choi*, Seok-Kwon Jeong*† and Joo-Ho Yang**

(Received 04 July 2016, Revision received 31 October 2016, Accepted 31 October 2016)

Abstract: A variable speed refrigeration system(VSRS) has been received high attention for energy saving ability. This paper investigates effects of design factors such as membership function range and sampling time to control performances for systematical designing fuzzy logic controller of the VSRS. Some comparisons of control performance between the fuzzy and PI are conducted including comparative evaluation of robustness against noise by using computer simulations. The simulation results showed that the fuzzy is very useful design method for engineers in the industrial fields which have big noises system and deal with inherent nonlinear system like the VSRS.

Key Words : Fuzzy logic control(FLC), Robustness, Variable speed refrigeration system(VSRS), Design factor

1. 서 론

최근 에너지 절약을 위한 가변속 냉동시스템의 제어가 주목받고 있다. 하지만 냉동사이클 고유의 강한 비선형성으로 인해 제어용 선형 모델 구축이 쉽지 않다.¹⁾ 실험으로 구한 선형 근사 모델에 근거한 PID 제어는 모델이 갖는 불확실성 등으로 정밀한 온도제어가 어렵고, 외란에 대한 강인성 확보도 용이하지 않다. 이처럼 비선형성이 큰 시스템의 효율적 제어법으로 퍼지제어(Fuzzy Logic Control; FLC)가 많이 적용되고 있다.²⁻⁶⁾ 냉동사이클의 퍼지제어 관련 최근 연구로는 비등구간 멤버십 함수를 이용한 온도제어,¹⁾ 가변속 냉동시스

템의 퍼지제어기 설계에 관련된 논문⁷⁻¹¹⁾ 등이 발표되어 있다. 하지만 연구들 대부분은 제어성능 향상에 주목할 뿐 퍼지제어기의 주요 설계 인자들인 제어오차의 멤버십 함수 범위나 제어주기 등이 제어성능에 미치는 영향에 대해서는 상세히 분석하고 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 냉동시스템의 체계적인 퍼지제어기 설계가 가능하도록 주요 설계 인자들이 제어성능에 미치는 영향을 집중 분석한다. 우선 주된 설계 인자인 제어오차 및 제어오차 변화율의 멤버십 함수 범위와 제어주기의 영향을 분석한다. 마지막으로 퍼지제어기와 PI제어기와의 외란에 대한 강인성, 제어성능 비교를 통해 퍼지제어기의 장·단점을 분석한다.

*† 정석권(교신저자) : 부경대학교 냉동공조공학과

E-mail : skjeong@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6181

*최성운 : 부경대학교 대학원 냉동공조공학과

**양주호 : 부경대학교 기계시스템공학과

*† Seok-Kwon Jeong(corresponding author) : Department of Refrigeration and Air Conditioning Engineering, PKNU.

E-mail : skjeong@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6181

*Sung-Woon Choi : Department of Refrigeration and Air Conditioning Engineering, Graduate School, PKNU.

**Joo-Ho Yang : Department of Mechanical System Engineering, PKNU.

본 연구에서는 제어성능이 실험을 통해 이미 검증된 퍼지제어기를⁴⁾ 사용하여 최적화된 주요 설계 인자들의 값들을 임의로 변화시켜 이들이 제어성능에 미치는 영향을 상세히 분석하였다.

Table 2는 챔버 온도와 과열도 제어에 실제로 사용된 압축기 및 EEV 제어용 규칙베이스이다.⁸⁾

2. 냉동사이클의 온도제어용 퍼지제어기

2.1 퍼지제어기의 기본 구성

Fig. 1은 퍼지제어기의 기본 구조이며 퍼지화(fuzzification)기, 지식베이스(knowledge base), 퍼지 추론(fuzzy inference), 비퍼지화(defuzzification)기로 구성된다. 지식베이스는 데이터베이스(data base)와 규칙베이스(rule base)로 구성되며, 규칙베이스는 IF-THEN 형식으로 기술된다.

Fig. 2는 퍼지로직을 이용한 챔버(chamber) 온도 제어시스템 개념도이다. 제어량은 챔버의 내부 온도 T_i 와 에너지 절약을 위한 과열도 T_s 이며, T_s 는 증발기 입·출구 온도차 $T_o - T_i$ 이다. 제어대상은 압축기와 전자팽창밸브(EEV), 조작량은 인버터 주파수(Hz)와 EEV 개도(%) 지령값이다. Table 1과

Table 1 Fuzzy 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 2 Fuzzy 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

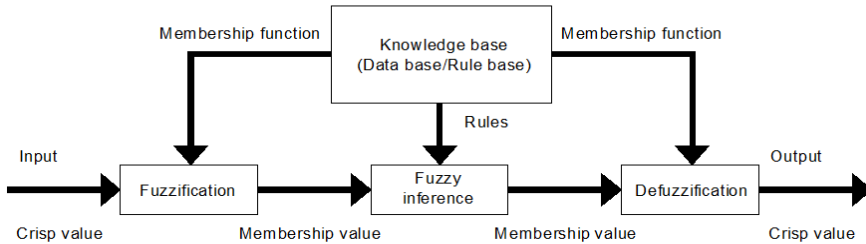


Fig. 1 Composition of fuzzy logic control

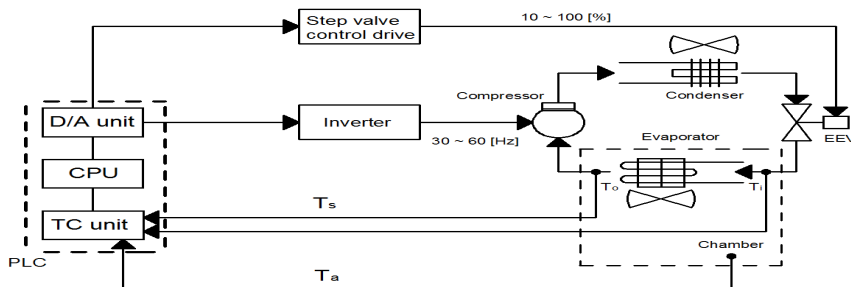


Fig. 2 Schematic diagram of refrigeration control system

비퍼지화기는 일반적으로 식 (1)과 같은 무게중심법(Center Of Gravity method; COG)으로 최종 출력값을 연산한다.

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

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

2.2 퍼지제어기의 설계 인자

퍼지제어기의 주요 설계 인자로는 제어오차 e 와 그 시간변화율 ee 가 주로 사용되며 이들은 정특성 실험을 통해 설계되었다.¹⁾ ee 에 영향을 미치는 제어주기(t_s) 또한 주요 설계 인자에 속한다.

본 연구에서의 제어량인 챔버 온도 T_a 와 과열도 T_s 를 제어하기 위한 퍼지제어기가 독립적으로 설계된다. 설계시에는 입력변수와 출력변수(의 멤버십함수, 그리고 그 범위를 우선적으로 정의한다. 입력변수로는 각 제어량의 설정값과 현재값의 편차인 $e(=T^*-T)$ 와 그 시간변화율 $ee(=\Delta e/t_s)$ 를 이용한다. 출력변수로는 챔버 온도 T_a 제어의 경우, 압축기의 회전수 변화량에 대응하는 인버터 주파수 변화량 Δf_c 이며, T_s 제어의 경우는 EEV 개도 변화량 ΔV_e 이다. 입·출력 변수의 멤버십함수는 7개의 퍼지수를 갖는 가장 일반적인 형태의 등구간 연속 삼각형을 사용하였다. 멤버십 함수에서 사용되는 입력변수 e , ee 와 출력변수 Δf_c , ΔV_e 의 대응 범위는 제어대상의 정특성 실험을 통한 조작량과 제어량 사이의 관련 데이터로부터 선정하는 것이 일반적이다.¹⁾

퍼지제어기의 출력값은 추론부에서 Fig. 3을 통해 퍼지화된 입력값과 Table 1, Table 2의 규칙베이스를 이용하여 연산된다. 이 추론에는 Mamdani의 최소-최대법을 적용, 퍼지화된 입력은 최소값, 출력은 최대값을 선택하였다. 추론부에서 최종 출력값을 구하는 비퍼지화 과정에서는 식(1)의 무게중심법을 사용하였다.

Fig. 3은 T_a 와 T_s 제어를 위한 압축기 및 EEV

제어용 입·출력 멤버십함수이다. 이 멤버십함수들의 범위들은 제어대상에 대한 정특성 실험을 통해 얻어진 선행 연구값을 그대로 이용하였다.⁸⁾

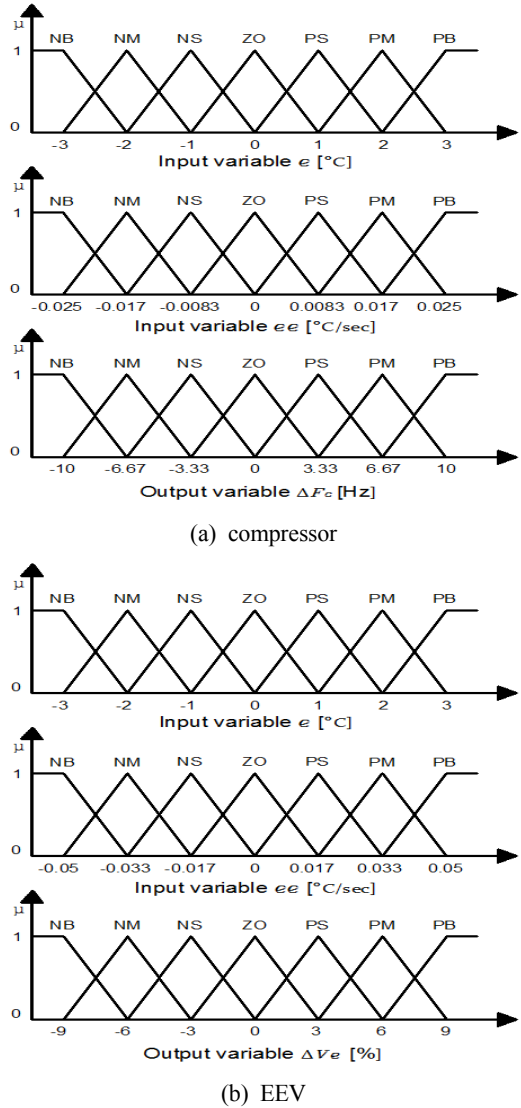


Fig. 3 Input and output variables for the FLC

3. 컴퓨터 시뮬레이션 및 고찰

Table 3은 본 연구에서 상정한 챔버 온도 제어 시스템의 주요 사양을 나타낸다. Fig. 4는 FLC의 설계 인자들이 제어성능에 미치는 영향 분석 시뮬

레이션을 위한 매트랩(Matlab) 프로그램 개념도이다. 그림에서 $G_i(s)$ ($i=1,2$)는 시뮬레이션을 위해 특별히 동특성 실험으로 구한 압축기와 EEV의 전달함수이다. 챔버 온도 설정값은 4°C , 과열도 설정값은 6°C , 초기온도 값은 28°C 로 각각 설정하였다.

식 (2)와 식 (3)은 시뮬레이션에 사용된 압축기와 EEV의 전달함수를 나타낸다. 실제 시뮬레이션에서는 부동작시간(dead time)을 갖는 전달함수의 경우, 파데1차 근사(Pade approximation)를 적용한 선형 근사 모델인 식(4)를 이용하였다.⁸⁾

Table 3 Specifications of the test unit

Item	Value
Compressor	Vertical, 220 V, 1.5 kW
Condenser	Fin-tube, 4 kW
Evaporator	Fin-tube, 0.79 kW
Refrigerant	R-22
Chamber	120*700*1650 [mm]
Inverter	PWM, 1.5 kW
EEV drive	In/out voltage : DC12 V

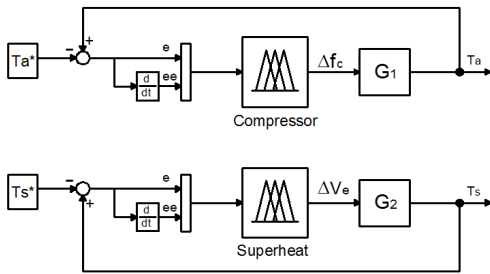


Fig. 4 Conceptual diagram for simulations

$$G_1(s) = \frac{\Delta T_a}{\Delta f_c} = \frac{-0.42}{680s + 1} \quad (2)$$

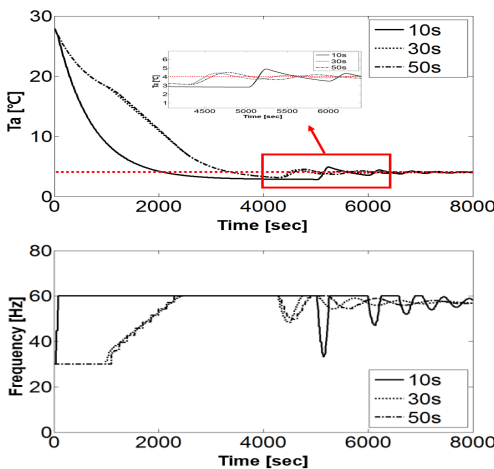
$$G_2(s) = \frac{\Delta T_s}{\Delta V_e} = \frac{-0.38}{57s + 1} e^{-16s} \quad (3)$$

$$G_2(s) \approx \frac{-0.38s - 0.0475}{57s^2 + 8.125s + 0.125} \quad (4)$$

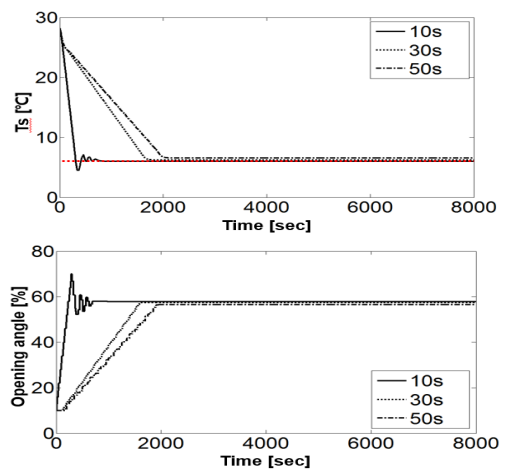
Table 4 Design factors for simulations

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	-

Table 4는 시뮬레이션에 사용된 설계 인자들의 각 값을 나타낸다. T_a, T_s 모두 t_s 가 30초인 경우를 표



(a) Chamber temperature and its reference



(b) Superheat and its reference

Fig. 5 Effect of sampling time

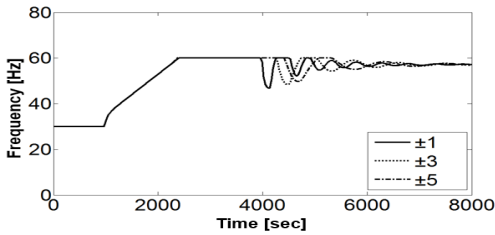
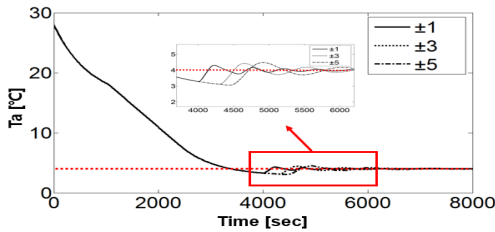
준(standard)으로 하여 각 인자들의 값을 임의로 변경하였다. 시뮬레이션에서는 주된 설계 인자인 t_s 와 e 그리고 ee 가 제어량 T_a, T_s 에 미치는 영향에 대해 분석하였고, 한 인자의 영향 분석시에는 나머지 두 인자를 표준 경우의 값으로 고정하였다. 결과 고찰을 위해 제어량에 대응하는 조작량의 값을 제어량의 응답과 동시에 나타내었다.

Fig. 5는 제어주기 t_s 가 10s, 30s, 50s일 때 T_a, T_s 의 응답과 그 조작량을 각각 나타낸다.

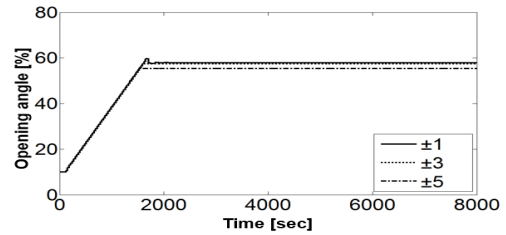
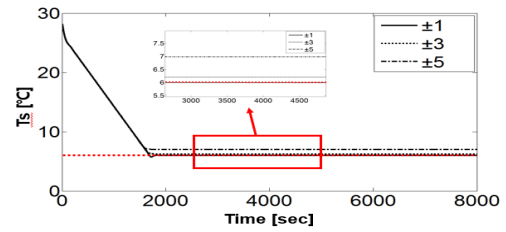
Fig. 5에서 T_a, T_s 의 가장 빠른 응답은 t_s 가 가장

짧은 10s의 경우로 나타났다. 하지만 나머지 두 경우는 유사한 응답 속도를 보였다. 이는 조작량(control input)에서 볼 수 있듯이 t_s 가 짧을수록 ee 의 값이 상대적으로 커서 전체 조작량이 매우 큰 값으로 되기 때문이다. 제어주기가 일정값 이상일 경우는 ee 의 영향이 거의 무시되므로 제어량의 응답에 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다.

Fig. 6은 e 의 범위에 따른 T_a, T_s 의 응답과 그 조작량의 변화를 나타낸다. T_a, T_s 의 수렴 속도는 멤버십함수 e 의 범위에 큰 영향을 받지 않는 것

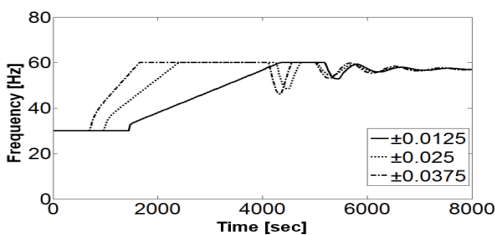
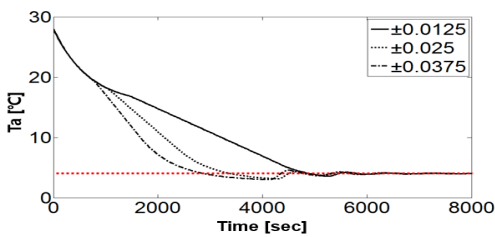


(a) Chamber temperature and its control input

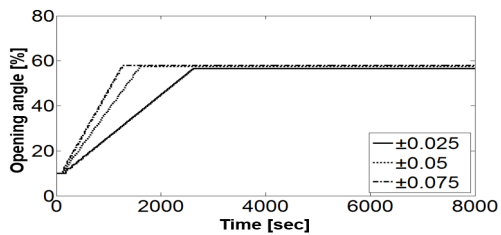
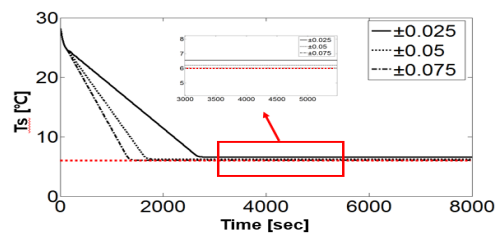


(b) Superheat and its control input

Fig. 6 Effect of e membership range



(a) Chamber temperature and its control input



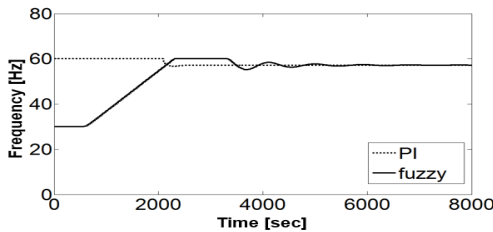
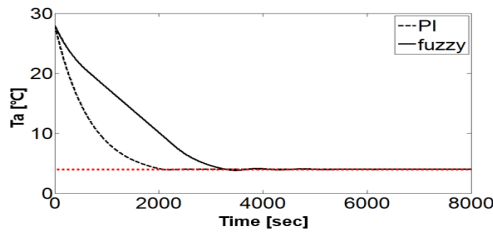
(b) Superheat and its control input

Fig. 7 Effect of ee membership range

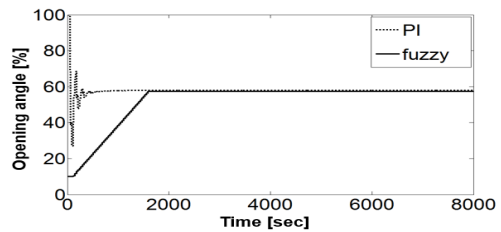
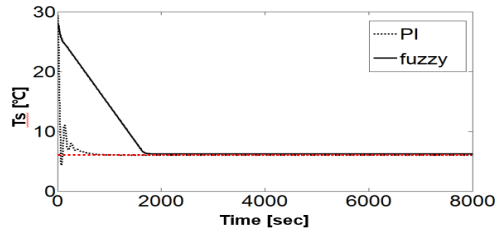
으로 보인다. 그 까닭은 초기값과 목표값의 차가 매우 커, 조작량이 순식간에 하한과 상한의 포화값에 도달하기 때문이다. T_a 의 정상응답에서는 e 의 범위가 작을수록 오차에 대한 민감도가 커, 조작량의 변동으로 인해 짧은 주기의 미세한 진동이 발생함을 알 수 있다. 한편 T_s 의 응답은 미소한 정상상태오차가 발생하는데 이는 Table 2의 과열도 규칙베이스에서 e 가 NS 혹은 PS인 경우($ee=ZO$) 출력이 ZO로 설계되어 있기 때문이다.

Fig. 7은 ee 의 범위 변동에 따른 제어량의 응답과 그 조작량의 변화를 나타낸다. Fig. 7에서 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 증가하게 되기 때문이다. 과열도 T_s 의 응답에서 정상상태오차가 발생하는 까닭은 Fig. 6에서와 마찬가지로 과열도 규칙베이스의 설계값에 그 원인이 있다.

Fig. 8은 PI와 퍼지 제어기의 제어 성능을 비교

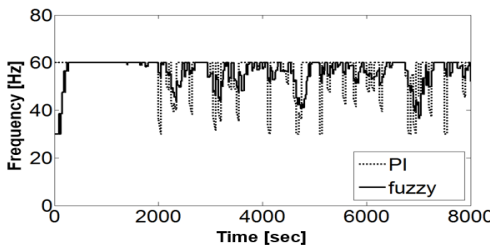
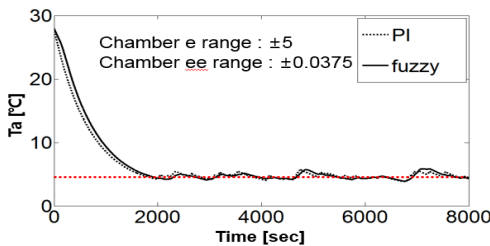


(a) Chamber temperature and its control input

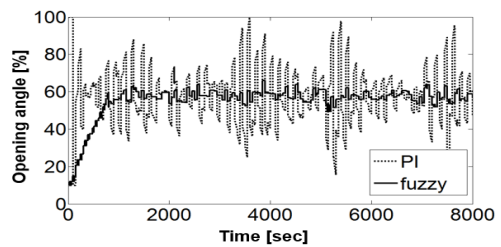
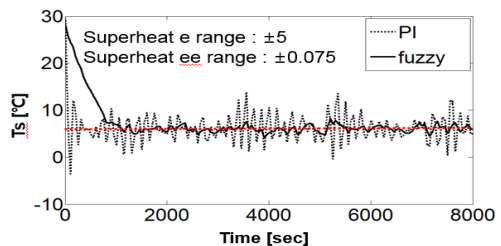


(b) Superheat and its control input

Fig. 8 Comparison of control performance between fuzzy and PI control

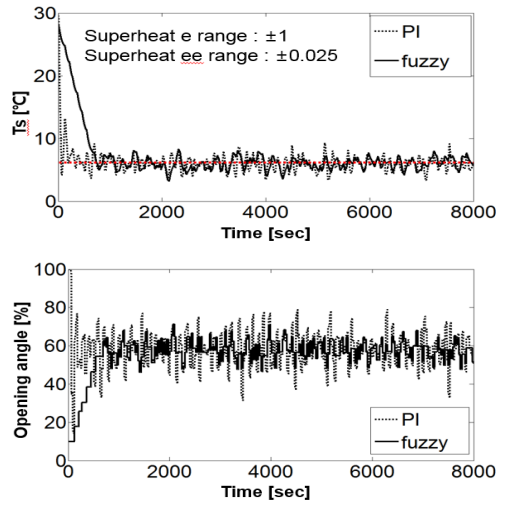
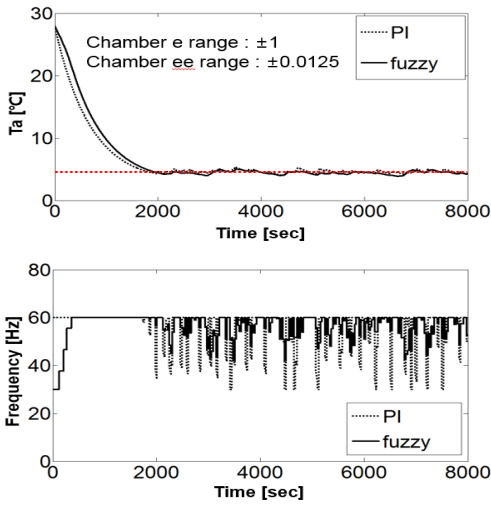


(a) Chamber temperature and its control input



(b) Superheat and its control input

Fig. 9 Effect of noise addition in fuzzy control and PI control with maximum membership range



(a) Chamber temperature and its control input

(b) Superheat and its control input

Fig. 10 Effect of noise addition in fuzzy control and PI control with minimum membership range

한 결과이다. PI제어기는 식 (2), 식 (3)을 기반으로 매트랩 튜너(tuner)를 통해 얻은 게인을 미세 조정하였다. 설계된 압축기용 게인은 $K_p = 22.8, K_i = 0.145$, 과열도는 $K_p = 6.62, K_i = 0.037$ 이며, 이산계($t_s = 30s$)로 시물레이션 하였다. 퍼지제어기는 Table 1, Table 2의 규칙베이스와 Fig. 3의 멤버십함수를 이용하였고, PI와 동일한 샘플링 주기로 시물레이션 하였다. 제어 성능은 과도 특성 면에서는 PI제어기가 퍼지보다 월등히 양호한 성능을 보였고, 정상 특성은 두 제어법이 유사하였다.

Fig. 9와 Fig. 10은 PI와 퍼지제어기의 노이즈에 대한 강인성을 비교한 결과이다. PI제어기와 퍼지제어기 모두 엔티 와이드업 제어를 부가하였다. 외란은 인버터 사용으로 인한 노이즈를 가정하여 크기가 ± 1 인 백색잡음(white noise)을 인가하였다. 두 그림에서 T_a 의 조작량은 외란의 영향이 크게 나타나지만 제어량에는 시정수가 큰 시스템의 특성상 그 영향이 미미하였다. PI와 퍼지의 노이즈 영향 비교에서는 퍼지가 노이즈에 더 강한 것으로 나타났다. 한편 T_s 의 경우는 짧은 시정수로 인해 응답과 조작량 모두 노이즈의 영향이 크게 나타났고, 퍼지가 PI 제어기보다 노이즈에 강인함을 알 수 있었다.

Fig. 9와 Fig. 10의 비교를 통해 멤버십함수의 범위가 클수록 제어량과 조작량의 변동폭이 커지며, 작을수록 노이즈에 대한 민감도가 커 조작량의 크기가 빈번하게 변동함을 알 수 있다. 조작량의 큰 폭의 빈번한 변동은 조작기인 인버터나 EEV의 수명을 단축시킬 수 있으므로 퍼지 제어기의 사용이 더 바람직할 것으로 생각된다.

PI와 퍼지 제어기의 제어성능은 T_a, T_s 모두 정상응답은 거의 유사한 거동을 보였고, 과도응답은 시물레이션 범위 내에서는 PI가 다소 양호하게 나타났다. 두 제어기의 응답 성능에 대한 엄밀한 정량적 비교 평가는 시물레이션의 설정 조건에 따라 Fig. 10에서와 같이 큰 차이가 없는 경우도 있으므로 생략하였다. 반면에 퍼지는 PI 제어기보다 노이즈에 강인한 특성을 보였다. 결과적으로 퍼지는 제어대상의 모델링이 필요하지 않아 모델의 불확실성이나 비선형성 등에 강인한 제어 특성을 발휘할 수 있다는 점이 가장 큰 장점으로 꼽힌다. 특히 인버터를 사용하는 가변속 냉동사이클의 경우 고조파 노이즈의 영향으로 인한 PI제어기의 성능 열화가 심각하므로 노이즈에 강인성을 갖는 퍼지제어기의 활용이 매우 바람직할 것으로 생각된다.

4. 결 론

References

본 논문에서는 냉동사이클의 체계적인 퍼지제어기 설계를 위해 제어주기, 멤버십 함수의 범위 등의 주요 설계인자들이 제어성능에 미치는 영향을 상세히 검토하였다. 또한 노이즈 혼입에 대한 제어기의 강인성을 기존 PI제어 결과와 비교하였다. 시뮬레이션을 통해 얻은 주요 결과들을 요약하면 다음과 같다.

1) 제어주기 t_s 가 작을수록 조작량이 커지므로 제어량은 목표값에 빨리 수렴한다. 다만, 일정값 이상의 긴 제어주기에서는 제어편차의 시간변화율인 ee 의 영향이 무시되므로 응답 변화가 거의 없었다.

2) 제어편차 e 의 범위는 조작량의 빠른 포화도 인해 제어량의 과도응답에 큰 영향을 미치지 않았다. 다만, e 의 범위가 작을수록 오차에 대한 민감도가 커 T_u 의 정상응답에 미소한 빠른 진동이 관측되었고, T_s 의 정상응답에는 규칙베이스 설정 영향으로 인해 미소한 정상상태오차가 발생하였다.

3) 제어편차의 시간변화율인 ee 의 멤버십 함수 범위가 클수록 제어량의 수렴 속도는 빨라지지만 정상상태오차에는 큰 영향이 없었다.

4) 퍼지제어기와 PI제어기의 제어성능을 단순 비교해 본 결과 과도특성은 비교적 PI가 양호하며, 정상 특성은 두 제어법이 유사한 것으로 나타났다.

5) 노이즈의 영향 분석 결과, 퍼지제어기가 PI제어보다 강인한 성능을 보였다. 다만, 시정수가 큰 챔버온도에는 노이즈의 영향이 거의 나타나지 않았다.

본 연구에서 분석한 설계 인자들의 영향은 퍼지제어기의 체계적인 제어기 구축에 유용한 설계 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대가 된다. 특히 퍼지제어는 제어용 모델이 필요 없고 외란에 강인한 특성을 가지므로 냉동사이클과 같이 모델링이 어렵고 비선형성이 강하며 운전시 인버터로부터 발생하는 노이즈의 영향이 심각한 시스템의 고효율 제어법으로써 크게 기여할 것으로 기대가 된다.

1. 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.
2. 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.
3. 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.
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 I. S. B. Pati, 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. H. Li, S. K. Jeong and S. S. You, 2009, "Feedforward Control of Capacity and Superheat for a Variable Speed Refrigeration System", Applied Thermal Engineering, Vol. 29, No. 5-6, pp. 1067-1074.
8. H. Li and S. K. Jeong, 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.
9. 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.
10. 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.
11. J. P. Cao, 2013, "Fuzzy Logic Controller Design with Unevenly-distributed Membership Function for High Performance Chamber Cooling System", Thesis of Master Degree, PKNU, pp. 43-44.