

열펌프 시스템의 난방 운전 시 최적 성능 제어에 관한 연구

유근중, 이일환, 이길봉*, 김민수**†

서울대학교 대학원 기계항공공학부, *LG전자 디지털 어플라이언스 연구소, **서울대학교 기계항공공학부

A Study on the Optimal Performance Control of Heat Pump System for Heating Mode Operation

Keun Joong Yoo, Il Hwan Lee, Gilbong Lee*, Min Soo Kim†

School of Mechanical engineering and Aerospace, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

*Digital Appliance Research Laboratory, LG Electronics, Seoul 153-802, Korea

ABSTRACT: The optimal control of heat pump performance for heating mode operation was investigated. Fuzzy logic was applied to control the heating performance of heat pump system and superheat at compressor discharge was taken as a control variable. Regression model was adapted to determine the optimal points where COP is maximized. Optimization of fuzzy rule table was investigated to improve operation performance of heat pump system. Experiments were carried out using original fuzzy table and the modified fuzzy rule table for heating mode operation of heat pump system. The results show that control performance of heat pump system with the modified fuzzy rule table was better than that with the original rule table.

Key Words: Fuzzy controller (퍼지 제어기), Fuzzy rule table optimization (퍼지 규칙표 최적화), Heat pump system (열펌프 시스템)

기호설명

DSH : 과열도, °C
f : 목적함수
T : 온도, °C
u : 오차

e : 증발기
d : 토출
set : 설정값
p : 현재값

하첨자

i : 입구
o : 출구
w : 2차 유체
c : 응축기

1. 서론

최근 소득 수준이 증가함에 따라 쾌적한 주거 환경과 작업환경에 대한 관심이 증가하면서 각 가정과 사무실에 에어컨과 같은 공조기기의 보급이 확대되고 있다. 이와 맞물려서 공조기기의 에너지 소비효율에 대한 중요성이 강조되고 있으며, 다양한 기술적 방법들을 적용하여 공조기기의 효율을 높이고자 하는 노력들이 활발하게 진행되고 있다. 높은 효율과 사용자의 쾌적성 증대를 위하여 제어기의 성능 향상이 중요하게 인식되고 있다.

기존에는 비례 제어, 비례-적분 제어, 비례-적분

†Corresponding author

Tel.: +82-2-880-8362

E-mail address: minskim@snu.ac.kr

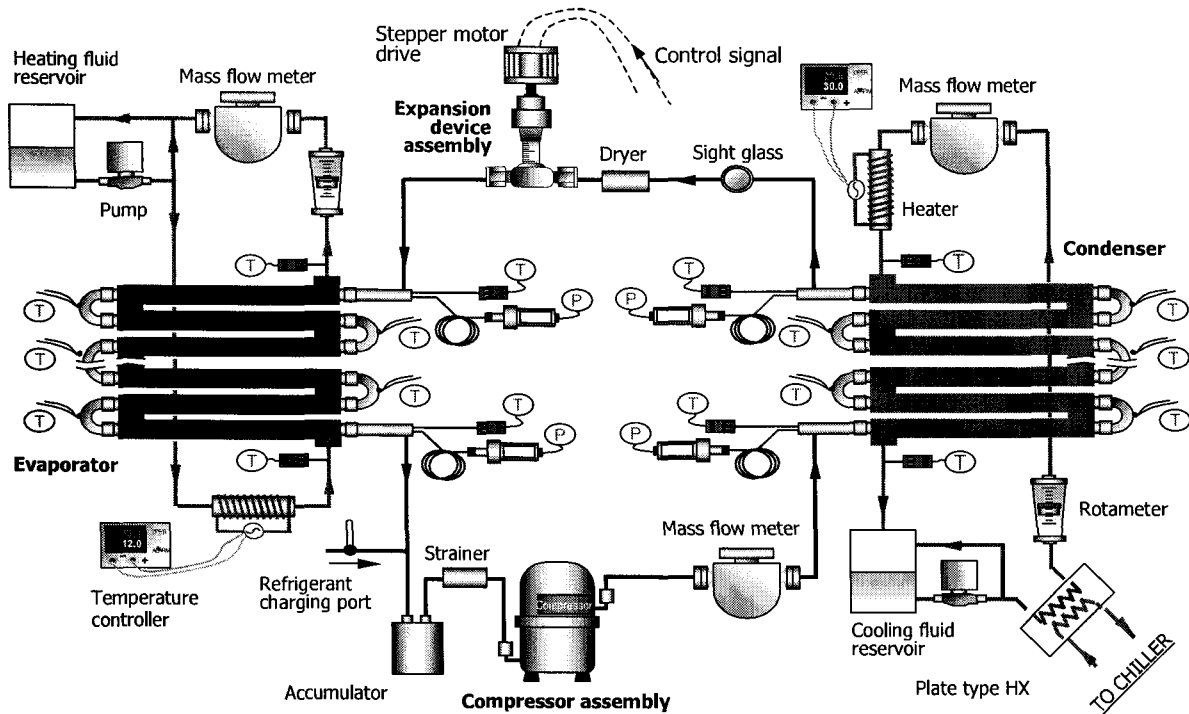


Figure 1 Schematic of the vapor compression system

비례-적분-미분 제어 등의 전통적인 제어방법이 주로 사용되어 왔으며 퍼지 로직을 이용한 제어 방법도 적용되고 있다.

퍼지 로직을 제어 시스템에 적용할 경우, 먼저 퍼지 제어기의 입출력 변수를 결정한 후에 각 변수들의 언어변수와 소속함수를 결정하게 된다. 퍼지 제어기를 설계한 후 퍼지 규칙표를 최적화하여 제어기의 성능을 향상시킬 수 있다. 퍼지 규칙표를 최적화할 수 있는 방법으로 크게 결정론적 방법과 확률론적인 방법이 있다. 결정론적인 방법은 목적함수의 기울기 정보를 이용하여 최적해를 구하기 때문에 국소적인 영역에서의 해를 구하는데 유용하고, 확률론적인 방법은 넓은 영역에서의 해를 구하는데 효과적이다.

본 연구에서는 퍼지 로직을 사용하여 열펌프 시스템을 제어하였고 일반적인 형태의 퍼지 규칙표를 결정론적인 방법을 사용하여 최적화하였다. 열펌프 시스템의 난방 모드로 운전할 때, 일반적인 형태의 퍼지 규칙표와 수정된 퍼지 규칙표들의 제어 성능을 실험을 통해 서로 비교하여 검증해 보았다.

2. 실험장치

본 연구에서 사용한 열펌프 시스템의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 열펌프 시스템은 압축기, 응축기, 증발기, 팽창장치로 구성되어 있으며, 이외에도 외기 조건을 모사하기 위한 2차 유체회로와 온도, 압력, 질량유량을 측정하기 위한 계측장치로 구성되어 있다. 응축기와 증발기는 모두 2중관 대향류 열교환기이며, 내관은 외경 9.53 mm, 외관은 외경 15.90 mm의 구리관을 사용하여 제작하였다. 증발기와 응축기의 길이는 각각 10 m로 동일하게 제작되었다. 냉매로 R410A를 사용하였다. 증발기 측 2차 유체로 에틸렌글리콜이 30% 포함된 브라인을 사용하였고, 응축기 측 2차 유체로 물을 사용하였다. 팽창장치로는 유량 제어가 용이한 선형팽창밸브 (Linear Expansion Valve, LEV)를 사용하였다. R410용 1RT급 스크롤 압축기를 사용하였고 인버터를 연결하여 압축기의 주파수를 30 Hz에서 100 Hz까지 조절하였다.

3. 열펌프 시스템의 퍼지 제어

3.1 정상 상태 실험

2차 유체의 증발기 및 응축기 측 입구 온도와 압축기 주파수를 고정한 상태에서 팽창 장치의 개도를 조절하여 성능계수(COP)가 최대가 되는 운전상태를 조사하였다. 외기 조건과 압축기 주파수를 변화시키면서 위와 같은 과정을 반복하여 각 조건마다 최적점을 구하였다. 이를 토대로 열펌프 시스템의 최적 운전상태에서의 압축기 출구 과열도를 시스템의 여러 변수들을 이용하여 회귀 모델식으로 표현하였다.

3.2 퍼지 제어기

본 연구에서는 압축기 주파수를 임의로 변화시켰을 때, 회귀모델식으로부터 결정되는 출구과열도가 제어 목표값이 되며, 출구과열도가 목표값에 도달하도록 팽창장치의 개도를 조절하였다. 이 과정에서 퍼지 제어기는 시스템으로부터 압축기 출구과열도의 목표값과 측정값 간의 오차와 오차의 시간 당 변화량을 입력으로 받아서 팽창 장치의 개도를 제어하게 된다.

3.3 퍼지 규칙표 선정 및 시뮬레이션

퍼지 규칙표는 퍼지 제어기에서 두 개의 입력을 받아 출력값을 정하는 역할을 한다. 세로축이

	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	
NB	NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZE	A
NM	NB	NM	NM	NS	NS	ZE	ZE	
NS	NB	NM	NM	NS	ZE	ZE	PS	C
ZE	NS	NS	ZE	ZE	ZE	PS	PS	
PS	NS	ZE	ZE	PS	PM	PM	PB	
PM	ZE	ZE	PS	PS	PM	PM	PB	
PB	ZE	PS	PM	PM	PB	PB	PB	

Figure 2 3 types of fuzzy rule table

오차값이고 가로축이 오차의 변화량인 7×7 퍼지 규칙표가 실험에 사용되었다. 퍼지 제어기의 성능을 높이기 위해 수정된 퍼지 규칙표들을 제안하였다.

제안된 퍼지 규칙표들의 제어 성능을 예측해 보기 위해 제어 시뮬레이션을 수행하였고 시뮬레이션은 매트랩(Matlab) 시뮬링크(Simulink)를 사용하였다. 제어 성능을 정량화하기 위해서 목적함수(f)를 오차값의 제곱을 적분한 값으로 정의하였다. 오차를 식 (1)에 나타내었고 목적함수를 식 (2)에 나타내었다.

$$u = DSH_{set} - DSH_p \quad (1)$$

$$f = \int_{t_0}^t u^2 dt \quad (2)$$

목적함수와 최대 출구과열도가 작을수록 제어

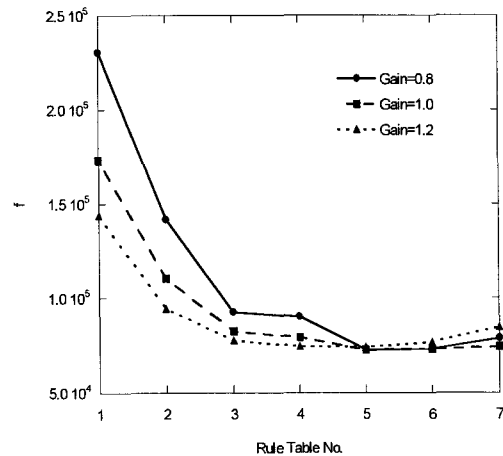
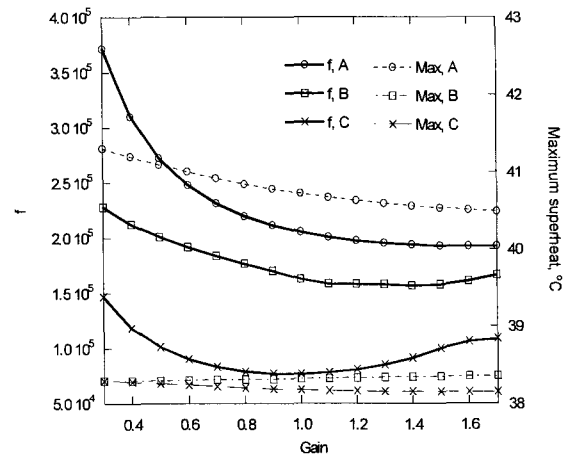


Figure 3 The results of simulation for optimizing fuzzy rule table

Table 1 Normalized outputs for optimization of fuzzy rule table

Rule Table	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
1	-1	0	0	0	0	0	1
2	-1	-0.30	-0.04	0	0.04	0.30	1
3	-1	-0.44	-0.11	0	0.11	0.44	1
4	-1	-0.67	-0.33	0	0.33	0.67	1
5	-1	-0.82	-0.58	0	0.58	0.82	1
6	-1	-0.87	-0.69	0	0.69	0.87	1
7	-1	-1	-1	0	1	1	1

성능이 더 좋음을 의미한다.

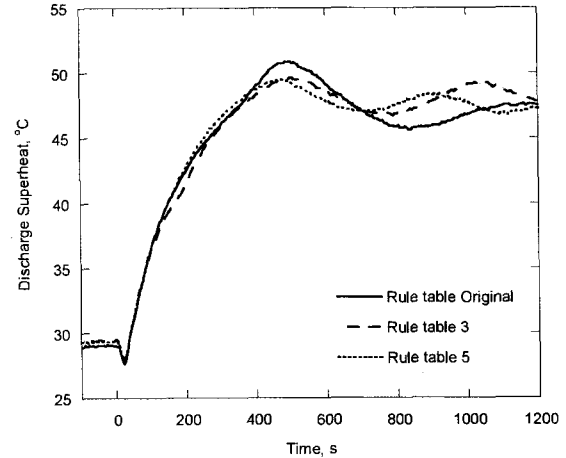
우선 일반적인 퍼지 규칙표를 살펴보면 오른쪽 상단에서부터 왼쪽 하단까지의 출력 언어변수가 ZE, 즉 출력값이 0임을 알 수 있다. 이 구역, 즉 출력값이 0인 구역을 Fig. 2에서와 같이 바꾸어 보았다. 시뮬레이션을 통하여 3가지 형태의 퍼지 규칙표들의 제어 성능을 비교하였다. 그 결과, B형과 C형 규칙표를 사용하였을 경우 A형을 사용하였을 경우에 비해서 목적함수값이 각각 18%, 60% 정도 감소하였다.

퍼지 규칙표에서 언어변수의 출력값 변화가 제어 성능에 어떻게 영향을 미치는지 알아보기 위해서, C형 퍼지 규칙표의 출력값들을 Table 1에서와 같이 바꾸어 보았다. 이렇게 변형된 퍼지 규칙표들의 제어 성능을 시뮬레이션을 통해 비교하였다. 5번과 6번 퍼지 규칙표를 사용한 경우 4번 퍼지 규칙표를 사용한 경우에 비해서 목적함수값이 각각 11%, 12% 정도 감소하였다. 1번, 2번, 3번, 7번 퍼지 규칙표를 사용한 경우는 목적함수값이 증가하는 것으로 나타났다.

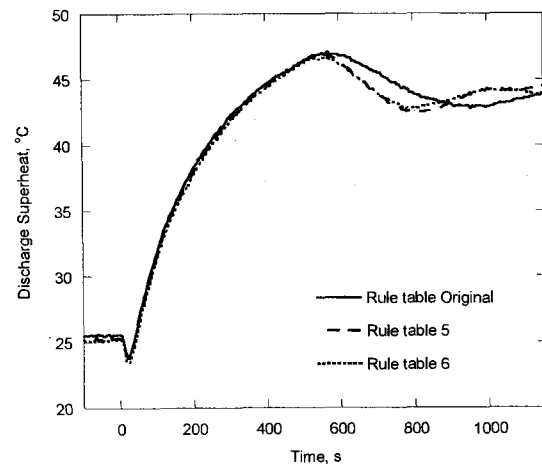
4. 실험 결과

4.1 실험 조건

저온 난방조건과 고온 난방조건으로 나누어 실험을 수행하였다. 두 가지 조건에 모두 미국냉동공조학회(ASHRAE)의 표준 조건을 포함하여 실험 범위를 설정하였다. 저온 난방운전에서는 실외기 측 2차유체 입구온도를 -10°C 에서 -5°C 까



(a) Inverter frequency is changed from 50 to 100 Hz at $T_{ewi}=-8.3^{\circ}\text{C}$, $T_{cwi}=21.1^{\circ}\text{C}$

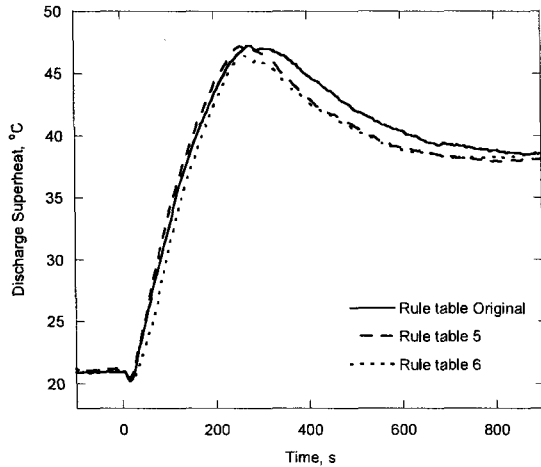


(b) Inverter frequency is changed from 40 to 90 Hz at $T_{ewi}=-5.0^{\circ}\text{C}$, $T_{cwi}=23.0^{\circ}\text{C}$

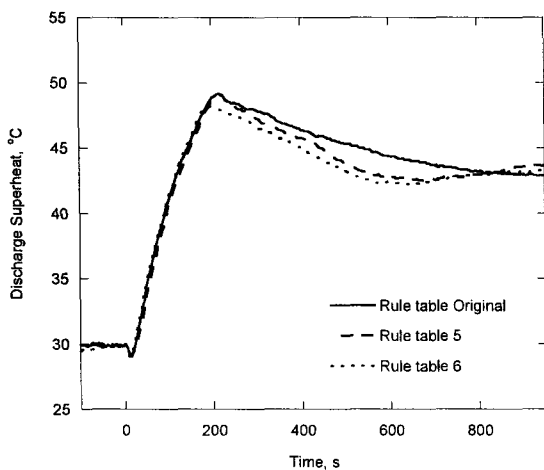
Figure 4 Dynamic characteristics at low temperature condition

지, 실외기 측 2차유체 입구온도를 19°C 에서 23°C 까지 변화시켰고, 고온 난방운전에서는 실외기 측 2차유체 입구온도를 5°C 에서 10°C 까지, 실so기 측 2차유체 입구온도를 20°C 에서 23°C 까지 변화시켰다. 압축기의 주파수는 30 Hz에서 100 Hz까지 변화시켰다.

본 연구에서는 일반적인 퍼지 규칙표와 시뮬레이션에서 좋은 제어 성능을 보여 준 5번과 6번 퍼지 규칙표를 제어기에 사용하였다.



(a) Inverter frequency is changed from 40 to 90 Hz at $T_{ewi}=8.3^{\circ}\text{C}$, $T_{cwi}=21.1^{\circ}\text{C}$



(b) Inverter frequency is changed from 60 to 100 Hz at $T_{ewi}=5.0^{\circ}\text{C}$, $T_{cwi}=20^{\circ}\text{C}$

Figure 5 Dynamic characteristics at high temperature condition

4.2 실험 결과

일반적인 형태의 퍼지 규칙표와 수정된 5번과 6번 퍼지 규칙표를 사용하여 제어 실험을 수행하였고 그 결과를 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 4에서는 실외기와 실내기 측 2차 유체의 입구온도가 각각 -8.3°C , 21.1°C 인 조건에서 압축기 주파수를 50 Hz에서 100 Hz로 변화시켰을 때의 결과와 2차 유체의 입구온도가 각각 -5.0°C ,

23.0°C 인 조건에서 압축기 주파수를 40 Hz에서 90 Hz로 변화시켰을 때의 결과를 보여주었다. Fig. 5에서는 실외기와 실내기 측 2차 유체의 입구온도가 각각 8.3°C , 21.1°C 인 조건에서 압축기 주파수를 40 Hz에서 90 Hz로 변화시켰을 때의 결과와 2차 유체의 입구온도가 각각 5.0°C , 20°C 인 조건에서 압축기 주파수를 60 Hz에서 100 Hz로 변화시켰을 때의 결과를 보여주었다.

제어 성능을 평가하기 위한 변수로 최대오버슈트(maximum overshoot)와 정착 시간(settling time)을 사용하였다. 정착 시간은 응답 곡선이 최종값의 5%내의 범위에 들어와서 머물게 되는 데 걸리는 시간으로 정의하였다.

5번 규칙표를 사용한 경우를 일반적인 규칙표를 사용한 경우와 비교해 보면, 최대 오버슈트는 0%~10% 정도 감소하였고 정착 시간은 약 5%~12% 정도 단축되었다. 6번 규칙표를 사용한 경우를 일반적인 규칙표를 사용한 경우와 비교해 보면, 최대 오버슈트는 8%~30% 감소하였고 정착 시간은 7%~29% 단축되었다.

4.3 결과에 대한 고찰

퍼지 규칙표의 출력 언어변수에 대응되는 출력값들을 Table 1의 5번, 6번과 같이 바꾸었을 때 일반적인 퍼지 규칙표보다 더 좋은 성능을 보여주었다. 이는 출구과열도의 오차가 클 때 팽창밸브의 개도를 더 크게 조절하고 오차가 작을 때 개도를 더 작게 조절함으로써, 응답곡선이 더 빠르게 수렴할 수 있음을 보여준다.

5. 결론

퍼지 로직을 이용한 열펌프의 최적 성능 제어에 관한 연구를 수행하였다.

(1) 제어 성능을 향상시키기 위해 수정된 퍼지 규칙표들을 제안하였다.

(2) 수정된 퍼지 규칙표들을 사용하여 시뮬레이션한 결과, 5번과 6번 퍼지 규칙표를 사용하였을 경우 좋은 제어 성능을 보여 주었다.

(3) 일반적인 퍼지 규칙표와 시뮬레이션을 통

해 얻은 5번과 6번 규칙표를 사용하여 퍼지 제어기를 설계하고 이 제어기를 이용하여 열펌프 시스템의 제어 실험을 통해서 검증하였다. 5번 규칙표를 사용한 경우는 일반적인 규칙표를 사용한 경우에 비해 최대 오버슈트가 평균적으로 10% 감소하였고 정착 시간은 평균적으로 12% 단축되었다. 6번 규칙표를 사용한 경우는 일반적인 규칙표를 사용한 경우에 비해 최대 오버슈트가 평균적으로 21% 감소하였고 정착 시간은 평균적으로 16% 단축되었다.

참고문헌

1. Tassou, S. and Qureshi, T., 1998, Comparative performance evaluation of positive displacement compressors in variable-speed refrigeration applications, *Int. J. Refrig.*, Vol. 21, No. 1, pp. 29-41.
2. Yang, D. S., Lee, G., Kim, M. S., Cho, Y. M., Hwang, Y. J., and Chung, B. Y., 2004, A study on the capacity control of a variable speed vapor compression system using superheat information at compressor discharge, *Proc. of the 10th International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, West Lafayette, Indiana, U.S.A.*, July. 14, Paper No. R164.
3. Chia, P. K., Tso, C. P., Jolly, P. G., Wong, Y. W., and Jia, X., 1997, Fuzzy control of superheat in container refrigeration using an electronic expansion valve, *HVAC&R Research*, January Vol. 3, No. 1, pp. 81-98.
4. Laue, H. J., 2000, Regional report Europe: heat pumps - status and trends, *Int. J. Refrig.*, Vol. 25, No. 1, pp. 414-420.
5. Underwood, C. P., 2001, Analysing multivariable control of refrigeration plant using Matlab/Simulink, *Seventh International IBPSA Conference*
6. Mathworks, 2000, Simulink - Dynamic system simulation for Matlab
7. ASHRAE, 1994, *ASHRAE Handbook - Refrigeration*, ASHRAE, Atlanta Georgia, U.S.A.
8. Ogata, K., 2003, *Modern control engineering*, 3rd ed., Prentice Hall, New Jersey, U.S.A.