

현대제어 이론을 이용한 냉동공조기의 정밀 온도제어

Precise Temperature Control by Modern Control Method on the Refrigerator and Air Conditioner

한 정만* · 유 휘룡* · 신 민생** · 김 상봉**

Jeong Man Han*, Hui Ryong Yoo*, Min Saeng Shin**, and Sang Bong Kim**

*부경대학교 대학원 기계공학과, **부경대학교 공과대학 기계공학과

Tel : (051) 620-6457, Fax : (051) 621-1411, E-mail : memcl@sun630cc.nfup.ac.kr

Abstracts : This paper describes a precise temperature control method for refrigerating and air conditioning systems. The control technique is based on the optimal servo control design method and the control algorithm is implemented on a personal computer. To control the precise temperature, two actuators such as an inverter for the compressor speed control and a stepping motor for regulating the expansion valve are used. The superheat and evaporator temperatures are chosen as the system output. So a multivariable system which has two inputs and two outputs to be controlled. The complecative model is identified by using an ARX(Auto Regressive eXogenous) model and the controller is designed by using the Matlab software.

Key words : Precise Temperature Control, Refrigerator and Air Conditioner, Servo Control, Superheat and evaporator temperatures, ARX(Auto Regressive eXogenous) model

1. 서론

냉동·공조기술은 근래 눈부신 발전을 하여 식품의 냉동·냉장 및 제빙을 비롯하여 대형건물의 공기조화에 이르기 까지 생활에 크게 기여하고 있다. 산업적으로는 상온이하의 과정을 필요로 하는 공업과 저온시험 등에 이용되고 있고, 가정에서는 냉방·열 펌프식 난방 등에 이르기까지 이용이 확대되고 있다^[1]. 특히 최근에는 우수한 냉매의 출현과 제어기술의 진보에 따른 냉동산업의 급속한 발전으로 그 이용분야가 점차 확대되어 가고 있다. 최근 압축기의 운전 주파수를 변경 가능한 인버터와 광범위의 유량제어가 가능한 전자팽창밸브가 개발되어 냉동사이클의 제어기로서 사용되고 있다. 쾌적성과 성능에너지 등의 관점에서 보다 더 섬세한 제어방법이 요구되고 있다^[6]. 냉동·공조 시스템의 제어에 관한 연구로서 양^[5] 등은 소형 가정용 냉장고를 대상으로 하여, 마이크로컴퓨터와 PWM(Pulse Width Modulation) 제어 방식의 인버터를 이용하여, 제어 목표로 냉동실내 온도를 일정하게 유지하기 위하여 압축기의 용량 제어(회전수 제어)를 행하고, 단속 운전(On-Off)시와 인버터 제어에 의한 연속 운전시의 냉각 속도, 주파수 응답, 냉동실내 온도 및 과열도 변화의 응답 특성에 대하여 연구, 검토하였다. 그리고 Naomi^[4] 등은 열펌프 에어컨의 제어에 퍼지이론을 사용하였고, 近藤^[6] 등은 냉동·공조 시스템의 제어를 위해 스텝 응답법과 주파수 응답법에 의한 시스템 동정 기법을 제안한 후 최적 레귤레이터 이론을 적용하였다. 近藤의 연구는 정확히 모델링할 수 없는 냉동·공조 시스템을 동정하였다는 점에서 우수하다고 생각될 수 있다. 그러나 스텝 응답법이나 주파수 응답법은 복잡한 냉동·공조 시스템을 너무 단순화 시켜서 표현한다는 단점을 갖고 있다.

본 논문에서는 ARX(Auto Regressive eXogenous) 모델에 의한 동정법으로 압축기의 용량(인버터 회전수)과 팽창밸브의 개도를 입력으로 하고 증발기의 입구온도와 흡입 과열도를 출력으로 하는 시스템을 좀더 정확히 동정하고 재구성하는 방법을 제안한다. 그리고 동정된 시스템을 이용하여 현대제어이론인 다변

수 서보계 설계법을 통해 제어를 설계한 후, 실제 냉동·공조 시스템에 적용하여 본 논문에서 제안한 냉동·공조 시스템의 동정기법 및 제어기의 유용성을 검증하였다.

2. 냉동공조 시스템의 개요

2.1 냉동공조 시스템의 구성

Fig. 1은 인버터로 압축기의 용량을 제어하고 팽창밸브를 사용하여 냉동장치를 구동하는 실험장치를 나타내고 있다. 압축기의 용량을 제어하는 인버터부, 냉매 유량을 제어하기 위한 팽창밸브 제어부 및 온도, 유량 데이터 측정부로 구성되어 있다. 압축기로는 0.75마력의 로터리식 완전 밀폐형을 사용하였으며, 압축기의 액압측과 장치의 안정성을 판별하기 위하여 증발기 출구 및 수액기 직후에 각각 sight glass 설치하였다. 증발기의 입·출구관 외부에 허용 오차 $\pm 0.4\%$ 의 T 열전대($\phi 0.2\text{mm}$)를 부착하여 온도를 측정하였다. 또, 냉매 유량은 전자 유량계와 체적식 유량계를 팽창밸브 직전의 액관에 설치하여 측정하였다. 모든 온도 데이터는 온도 계측기 RTI 820을 이용하여 PC에 전송하였으며, 실시간으로 모니터에 도시하였다. 팽창밸브는 제어기의 출력에 의해 스텝핑 모터로 그 개도를 조절하도록 하였으며, 제어량을 피드백하여 목표치와 비교한 제어기에 입력하여 그 결과에 의한 조작량을 제어 대상에 입력함으로써 목표치 추종 제어가 행해지도록 하였다. 각 샘플링 시간마다 이와 같은 동작은 반복되게 된다. 연산된 제어 입력 값인 압축기 구동 주파수는 PC에 내장된 D/A 컨버터를 이용하여 인버터로 전송하였으며, 작동 유체는 R-22를 사용하였다.

본 논문에서의 목적은 냉방표준 조건의 노후로 정상운전시 현탕이 생기지 않게 흡입 과열도 및 증발기의 입구온도를 일정하게 제어하는데 있다. 제어계에 있어 제어량은 증발기의 입구 온도와 흡입 과열도이고, 조작량은 팽창밸브 개도와 압축기 운전 주파수이다.

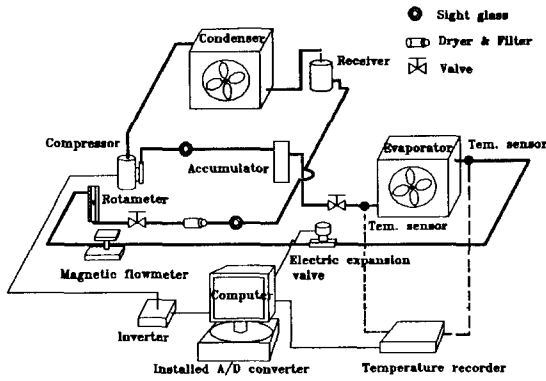


Fig. 1 The schematic diagram of experimental apparatus

3. 냉동공조 시스템의 모델화

3.1 냉동공조 시스템의 모델구성

전질에서 압축기와 팽창밸브에 대한 조작량을 조절함으로써 제어량이 제어되게 한다. 본 논문에서는 시스템의 특성을 조작량과 제어량 사이에 $G_{11}(s) \sim G_{22}(s)$ 로서 특성화한 4개의 전달 함수를 Fig. 2와 같이 표현하기로 한다.

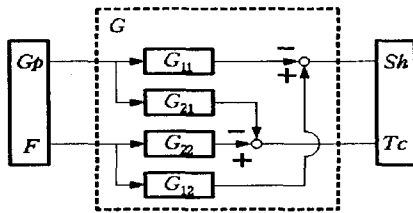


Fig. 2 Contents of control system

Fig. 2에서 G_p 는 팽창밸브의 개도를 F 는 압축기의 용량을 의미한다. 그리고 Sh 는 흡입 과열도를 T_c 는 증발기의 입구온도를 나타낸다.

시스템의 특성, 즉 $G_{11}(s) \sim G_{22}(s)$ 의 4개의 전달 함수를 명확히 하기 위해 Table 1에서 나타내는 입출력에서 입력을 확률 변수열, 즉 백색잡음을 인위적으로 생성하여 실제 시스템에 가한 후 각각의 전달 함수에 대한 입출력 벡터를 이용하여 동정을 하였다.

Table 1 A meaning of transfer a function

전달 함수	$G_{11}(s)$	$G_{12}(s)$	$G_{21}(s)$	$G_{22}(s)$
입력	G_p	F	G_p	F
출력	Sh	Sh	T_c	T_c

3.2 냉동공조 시스템의 시스템 동정

Table 1의 전달 함수를 실현하기 위해서는 시스템의 파라미터의 동정(Identification)이 필요하다. 시스템의 파라미터 동정은 스텝응답 및 주파수응답 등에 의한 방법이 알려져 있으나, 본 논문에서는 ARX(Auto Regressive eXogenous)모델에 의한 동정법^[10]으로 시스템의 파라미터를 동정하도록 한다.

ARX모델이란, 다음 식으로 주어지며

$$A(q)y(k) = B(q)u(k)$$

여기서

$$A(q) \approx 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_{na}q^{-na}$$

$$B(q) \approx b_1q^{-1} + \dots + a_{nb}q^{-nb}$$

입력 $u(k)$ 와 출력 $y(k)$ 으로 부터 두개의 다항식 $A(q)$,

$B(q)$ 를 구하는 것이 ARX모델에 의한 동정법이다. 그러나, ARX모델은 $u(k)$ 를 확률변수열, 즉 백색잡음과 같은 확률변수열의 경우에만 시스템의 입출력 관계로부터 기술될 수 있다. 따라서, 실제 시스템으로부터 동정을 행하기 위해서 $u(k)$ 는 백색성 동정입력이어야 하며, 이상적인 백색잡음은 실현 불가능하므로 인위적인 규칙에 따라 생성된 의사불규칙신호를 이용하여 한다. 이에 대한 대표적인 신호로서는 M계열(Maximum Length Linear Shift Resister Sequence)을 들 수 있다. 동정 입력을 M계열이 되도록 정하여 동정실험을 행하였다.

Fig. 3은 M계열에 의거하여 정해진 동정 입력을 나타내며 Fig. 3과 같은 입력을 가하여 흡입 과열도로서 동정을 행한 결과이다. Fig. 5는 팽창밸브의 개도와 증발기 입구온도사이의 전달 함수를, Fig. 6은 압축기의 운전 주파수와 흡입 과열도 사이의 전달 함수를, Fig. 7은 압축기의 운전 주파수 입력과 증발기의 입구온도 사이의 전달 함수를 동정한 결과를 보이고있다. 전선은 실제 시스템에서 얻은 출력을 실선은 동정된 시스템의 M계열 동정입력에 대한 출력이다.

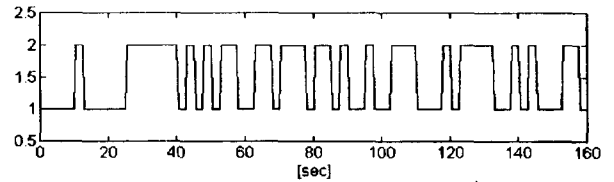


Fig. 3 Input M-Sequence signal

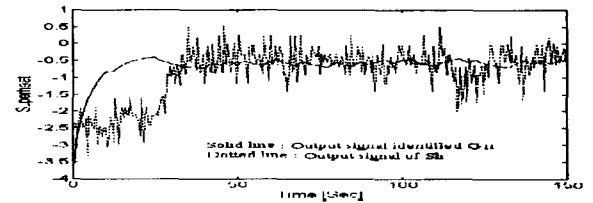


Fig. 4 Output signal of Sh and identified G_{11}

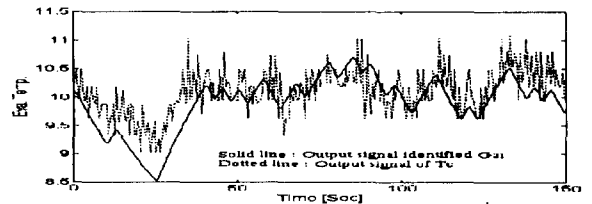


Fig. 5 Output signal of T_c and identified G_{21}

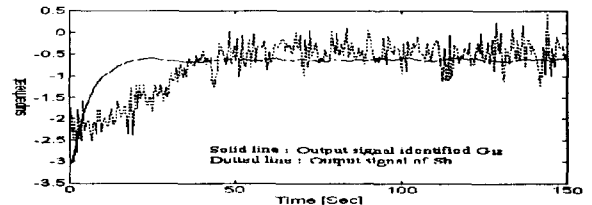


Fig. 6 Output signal of Sh and identified G_{12}

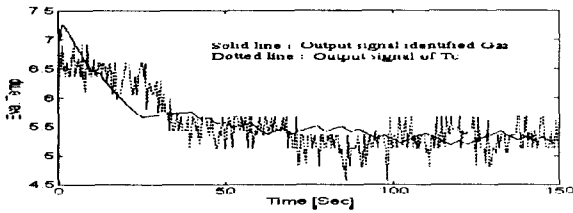


Fig. 7 Output signal of T_c and identified G_{22}

4. 최적제어기 설계

4.1 동정모델에 기초한 시스템의 구성

3.2절의 동정된 각각의 전달함수로부터 Fig. 2에서 $G(s)$ 의 구성법을 고려하면 다음과 같은 전체 전달함수를 얻을 수 있다.

$$G(s) = \begin{bmatrix} -G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ -G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix}$$

여기서,
 $G_{ij}(s) = C(SI - A_{ij})^{-1} B_{ij} + D_{ij}, \quad i, j = 1, 2$

이다.

그리고, 전달함수 G 를 최소 실현하면 다음과 같은 상태 방정식을 얻을 수 있다.

$$\dot{x} = Ax + Bu + D\varepsilon \quad (4.1a)$$

$$y = Cx \quad (4.1b)$$

여기서,

$$y = [T_c \quad Sh], \quad u = [Gp \quad F]$$

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A_{21} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A_{12} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} B_{11} & 0 \\ 0 & B_{21} \\ B_{22} & 0 \\ 0 & B_{12} \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} -C_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{12} \\ 0 & 0 & -C_{21} & C_{22} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

4.2 최적서보계법의 설계

본 절에서는 Davison이 보였던 적분형 서보계의 구성문제를 목표입력과 외란이 각각 서로 다른 동차 미분방정식으로 표현되는 경우로 일반화하여 미분 연산자법을 이용하여 확대계를 얻는 알고리즘을 이용하여 서보계를 설계한다^[9].

Step. 1 : 4.1절에서 얻어진 시스템을 제어대상으로 생각한다.

Step. 2 : 오차에 대한 상태 방정식을 다음과 같이 구성하고 목표값과 외란의 최소공배다항식을 식 (4.1)에 작용시키면 같은 확대계를 얻을 수 있다.

$$\dot{z}_i = N_i z_i + M_{ip}(D)x \quad (i = 1, 2) \quad (4.2)$$

단,

$$x_i = [e_i \ e_i^1 \ \dots \ e_i^{(q-1)}]^T$$

$$N_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ & & & \vdots & & \\ -a_0 & -a_1 & -a_2 & -a_3 & \dots & -a_{q-1} \end{bmatrix},$$

$$M_i = [0 \ \dots \ 0 \ C]^T$$

여기서, $P(D)$ 미분연산자 $D = d/dt$ 로 이루어진 목표값과

외란의 차분 방정식의 최소공배다항식을 의미하고, q 는 외란과 목표값의 차분방정식의 차원을 의미한다.

$$\dot{x}_e = A_e x_e + B_e v \quad (4.3a)$$

$$e = C_e x_e \quad (4.3b)$$

$$A_e = \begin{bmatrix} A & 0 \\ M & N \end{bmatrix}, \quad B_e = \begin{bmatrix} B \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C_e = [0 \ C]$$

$$M = \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \end{bmatrix}, \quad N = \text{diag}[N_1 \ N_2]$$

$$x_e = [P(D)x^T \ z_1^T \ z_2^T]^T, \quad v = P(D)u$$

Step. 3 : 확대계 (4.3)에 대하여 최적 레귤레이터 문제를 풀이 제어칙을 구한 후 서보보상기를 다음과 같이 설계한다.

$$u = F[x^T \ \xi^T]^T = [F_1 \ F_2][x^T \ \xi^T]^T \quad (4.4)$$

단,

$$\dot{\xi} = N \xi + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ I \end{bmatrix} e \quad (4.5)$$

이상을 블록선도로 나타내면 Fig. 8과 같다.

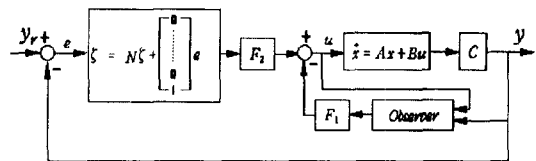


Fig. 8 Block diagram for obtained servo control system

5. 실험 및 고찰

2.1절에서 설명된 냉동·공조 시스템을 3장에서 동정 알고리즘에 따라 구한 상태 방정식의 시스템 행렬은 다음과 같다.

$$A = \begin{bmatrix} -0.51 & 1.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.47 & -1.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & -0.51 & 1.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.46 & -1.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & -0.65 & 1.1 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.43 & -1.1 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & -0.62 & 0.93 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0.06 & 0.0 \\ 0.23 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0062 \\ 0.0 & 0.0011 \\ -0.003 & 0.0 \\ -0.00046 & 0.0 \\ 0.0 & -0.077 \\ 0.0 & -0.015 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

4.2절의 확대계를 구성한 후 다음의 평가함수 J 를 최소화하는 F 는

$$J = \int_0^{\infty} x_e^T(t) Q_e x_e(t) + v^T(t) R_e v(t) dt \quad (5.1)$$

다음과 같다.

$$F = [F_1 \mid F_2]$$

$$F_1 = \begin{bmatrix} 1.1 & 0.9 & -1.0 & -1.0 & 0.3 & 0.3 & -0.7 & -0.5 \\ 0.2 & 0.1 & 3.6 & 3.5 & -1.1 & -1.0 & -0.1 & -0.1 \end{bmatrix}$$

$$F_2 = \begin{bmatrix} 0.2 & -0.08 \\ 0.08 & 0.3 \end{bmatrix}$$

단,

$$Q_e = \text{diag}[0.01 \ 0.01 \ 0.01 \ 0.1 \ 0.01 \ 0.01 \ 0.01 \ 0.01$$

$$0.01 \ 0.01 \ 0.01]$$

$$R_e = \text{diag}[0.1 \ 0.1]$$

로 설정하였다.

실제 시스템에서는 센서로부터 두개의 상태만이 출력되기 때문에 나머지 상태를 추정하기 위해서 다음과 같은 동일 차원 관측기를 설계한다.

$$\hat{\dot{x}} = (A - HC)\hat{x}(t) + Hy(t) + Bu(t)$$

최적 레귤레이터 문제에서 하중 행렬 $Q = I$, $R = I \times 0.01$ 로 두었을 경우 H 는 다음과 같이 구해진다.

$$H = \begin{bmatrix} -0.59 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.29 & 0.093 \\ 0.0 & 0.0 & -0.56 & -0.22 & 0.31 & 0.099 & 0.0 & 0.0 \end{bmatrix}^T$$

설계된 제어기와 관측기를 샘플링 시간 0.5초로 이산화 하여 제어를 행하였다.

Fig. 9는 증발기 입구온도의 목표값을 5°C, 흡입과열도의 목표값을 5°C로 주었을 경우의 시스템 응답이다. Fig. 10은 팽창밸브 개도와 압축기의 용량 즉 인버터의 회전 주파수를 나타내고 있다. Fig. 9에서 볼 수 있듯이 정정시간이 2분 이었고 정상상태에서 오차는 1.0°C 미만으로 상당히 양호한 결과를 보이고 있다.

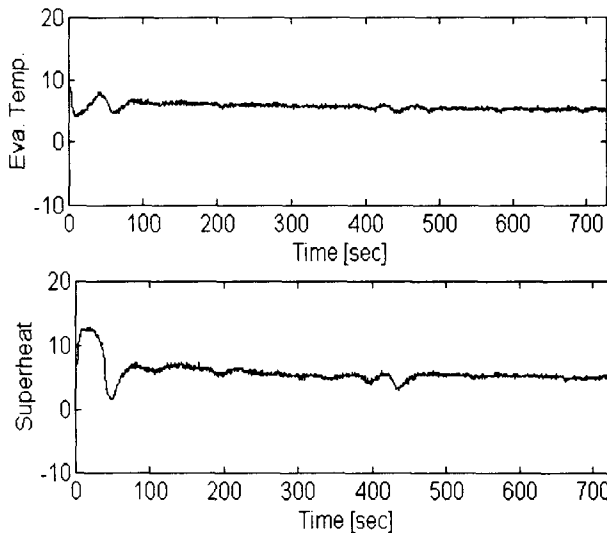


Fig. 9 Response of the system for the step reference

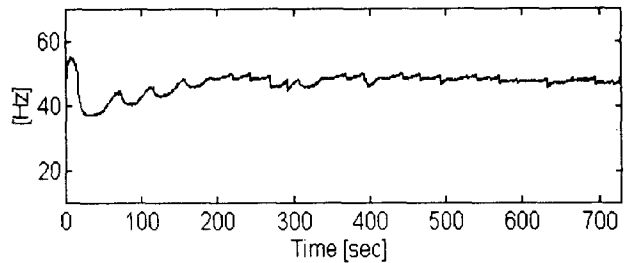
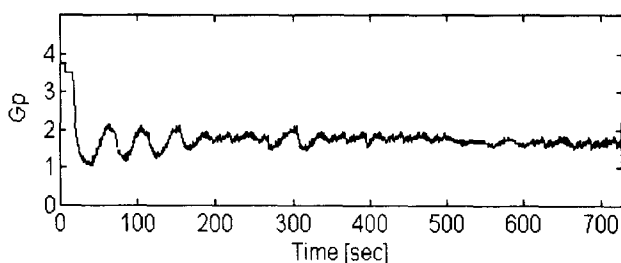


Fig. 10 Control input

6. 결론

마이크로 컴퓨터, PWM제어 방식의 인버터 그리고 스테핑모터를 이용하여, 증발기의 과열도 및 증발기 입구의 증발온도를 제어대상으로 하여 냉동·공조시스템의 압축기 용량과 팽창밸브의 냉매유량 제어에 관한 실험적 검토를 행한 결과, 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 본 논문은 ARX(Auto Regressive eXogenous)모델에 의한 동정법으로 시스템의 파라미터를 동정하였고, 구하여진 파라미터를 이용하여 설계한 제어칙으로 실제 시스템에 제어를 행한결과, 양호한 응답특성을 얻을 수 있었다.

(2) 기존의 압축기 용량만을 제어하는 시스템에 비하여 팽창밸브의 냉매유량을 제어함으로 양호한 제어 특성과 에너지의 절감 효과 및 과열도 유지의 측면에서 그 유효성이 우수하였다.

앞으로, 시스템 전체의 최적제어를 위해서는 압축기, 팽창밸브의 냉매유량 뿐만아니라 열교환기의 송풍기 제어를 동시에 실시해야 할 필요성이 있다.

참고문헌

- [1] Choi, S. O., J. H. Kim, H. S. Yang, and J. S. Kim, "Study of control of refrigerant flow rate and characteristics of superheat in evaporator using electronic expansion valve", *KJACR*, Vol. 6, No. 4, pp. 380~387, 1994
- [2] Kimura N., "Electric expansion valves", *Refrigeratio*, Vol. 61, No. 701, pp. 231~238, 1986
- [3] Takahashi S., 1986, "Inverter room air conditioner", *Refrigeration*, Vol. 61, No. 701, pp. 249~252, 1986
- [4] Naomi, K., Akio, M., and Tadahiro K., "Development of Fuzzy Logic Control System for Heat Pump Air Conditioners," Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Technical Review, Vol. 27, No. 3, pp. 193~197, 1990
- [5] Yang H. S., H. S. Kim, J. H. Kim, S. B. Ki-m, and J. S. Kim, "Control of refrigerating compressor capacity using inverter", *KJACR*, Vol. 5, No. 2, pp. 94~101, 1993
- [6] 近藤 功, 三宅齊和, 相良正志, 須田信英, "電子膨脹弁とインバータによる冷凍サイクルの2變數制御", *日本冷凍協會學術講演論文集*, 61-11-19, 東京, pp. 77~80, 1986
- [7] 中野道雄 외 3명, "繰返し制御", *日本計測自動制御學會*, 1989
- [8] 김상봉, 하주식, "메카니칼 시스템 제어", 한미출판사, 1992
- [9] 박순실, "강인한 서보계설계와 R/C 헬리콥터 트레이닝 시뮬레이터 제어에의 응용", 1992
- [10] 足立修一, "시스템洞定理論", *日本計測自動制御學會*, 1993