

電子 팽창밸브를 利用한 蒸發器의 冷媒 流量 制御 및 過熱度 特性에 관한 研究

Study on Control of Refrigerant Flow Rate and Characteristics of Superheat in Evaporator using Electronic Expansion Valve

최 순 오*, 김 정 훈*, 양 현 석*, 김 종 수**
S. O. Choi, J. H. Kim, H. S. Yang, J. S. Kim

Key words : TEV : Thermostatic Expansion Valve(온도식 팽창밸브), Superheat(과열도), EEV : Electronic Expansion Valve(전자 팽창밸브), PID Control(PID 제어), Gain(이득), Feedback(피이드백), Sampling Time(추출 시간), Hunting(헌팅)

Abstract

An experimental study was performed to investigate the characteristics of refrigerant flow rate control and superheat in an evaporator with an electronic expansion valve(EEV).

The EEV used in this study was devised using a needle valve coupled with a stepping motor controlled by a personal computer. A PID control equation was used to control the superheat of the evaporator and to set the superheat to 5°C.

In order to determine an optimum running condition for the system, PID parameters were varied for the wide range of values. The running condition of an air conditioning system with a PI control was reasonably stable compared with that of the PID control. Experimental results for the PI control using parameter values, $K_p=1.5$, $T_i=400(\text{sec})$ and $T_s=6(\text{sec})$ show that the superheat reached its target value. When external disturbances were introduced to the system, the superheat target value was reached within about 3 minutes.

When the EEV was applied to the air conditioning system driven by an inverter, room temperature control was excellent.

기 호 설 명

M : 조작량 [°C]
 K : gain
 T : 시간 [sec]
 t : 온도 [°C]
 e : 편차 $(t_{sp-target} - t_{sp})$ or $(t_{r-target} - t_{room})$ [°C]
 k : 0, 1, 2, …

하 침 자

p : 비례 동작
 i : 적분 동작
 d : 미분 동작
 pid : PID 동작
 s : sampling value
 sp : 과열도
 $room$: 룸
 $sp-target$: 과열도 목표치

* 부산수산대학교 대학원
 ** 부산수산대학교 냉동공학과

r-target : 룸 온도 목표치

eva : 증발기 온도

out : 증발기 출구

1. 서 론

최근 산업계에서는 생산성 향상과 장치의 안전 운전 및 에너지 절약을 위하여 대부분의 설비를 자동화하고 있다. 특히, 생활 수준의 향상과 더불어 보급률이 급격히 증가하고 있는 냉동·공조기에 있어서는 쾌적성, 안전성 및 에너지 절약을 위하여 정밀한 제어가 필요하다. 따라서, 대량 생산용 소형 냉장고 및 공조기에는 마이크로 컴퓨터를 부착하여 제어하고, 대형 산업 냉동기는 컴퓨터를 이용하여 중앙 집중 방식으로 자동 운전 및 안전 점검을 하고 있다.¹⁾

증기 압축식 냉동 시스템의 제어 요소중에서 증발기의 과열도 제어(superheat control)는 그 냉동 장치의 효율 및 안정성에 큰 영향을 미친다. 즉, 압축기 및 증발기의 용량 제어시, 그 용량 변화에 따라 증발기의 과열도가 급격히 변하여 냉동 시스템을 불안정하게 하고, 압축기 파손의 우려도 있다.

증발기 출구의 과열도 제어를 위하여 종래에는 모세관 및 온도식 팽창밸브(TEV: Thermostatic Expansion Valve)가 널리 사용되었다. 그러나, 모세관 및 온도식 팽창밸브는 간단한 냉매 유량제어 기구이며, 냉동 장치의 운전 범위가 고정되어 있기 때문에, 압축기의 인버터 구동^{2,3)} 및 증발기의 열 부하 변동에 대한 신속한 유량 제어가 어려우며, 효율적인 냉동 시스템 제어가 불가능하다는 사실이 Higuchi 등의 연구⁴⁾에 의해 밝혀졌다.

이와 같은 결점을 보완하고 냉동 시스템의 효율적인 운전을 위하여 전자 팽창밸브(EEV: Electronic Expansion Valve)가 개발되었다. Yasuda 등⁵⁾은 전자 팽창밸브 사용시의 증발기 출구 과열도 특성에 대한 연구를 수행하여 성능의 우수함을 밝히고 있으나, 외란을 받을 경우 등 실제 장치 운전시의 특성 파악에 대한 많은 문제점이 남아 있는 실정이다.

또한, 국내에서는 이에 대한 연구가 전무한 실정이어서, 이 분야에 대한 연구가 절실히 요구되고

있다.

따라서, 본 연구에서는 전자 팽창밸브를 이용하여, 냉동 장치의 운전 상태 변화에 따른 증발기의 냉매 유량 제어 및 과열도 특성에 관한 실험적 연구를 수행하여, 냉동·공조 시스템의 최적 제어 시스템 구축을 위한 기초 자료를 제공하고자 하였다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

2.1 실험 장치의 개요

Fig.1에 실험 장치의 개략도를 나타내었다. 본 실험 장치는 기본 냉동 사이클 부분과 모형룸(test room)으로 되어 있으며, 압축기 용량을 제어하는 인버터 제어 회로, 냉매 유량을 제어하기 위한 전자 팽창밸브 제어 회로^{6,7)} 및 온도, 유량 데이터 측정 회로로 구성되어 있다. 모든 데이터 측정 및 제어는 PC로 수행하였다.⁸⁾ 압축기는 0.5RT의 왕복동식 완전 밀폐형을 사용하였으며, 압축기의 액압축과 장치의 안정성을 판별하기 위하여 증발기 출구 및 수액기 직후에 각각 냉매 상태 관찰용 sight glass를 설치하였다. 증발기의 입출구 관 외부 및 모형 룸 내에 허용 오차 $\pm 0.4\%$ 의 동·콘스탄탄 열전대($\phi 0.2$ mm)를 부착하여 온도를 측정하였으며, 냉매 유량

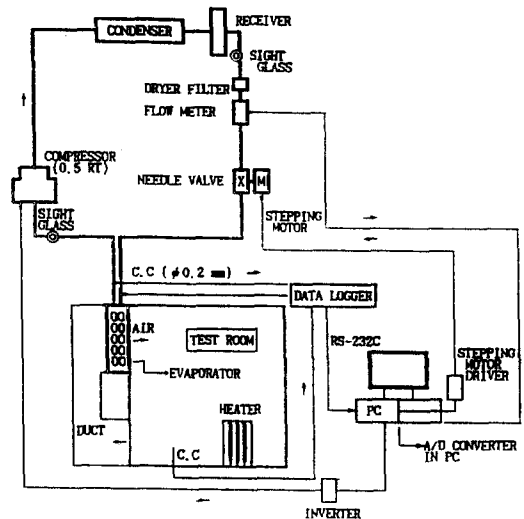


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus using inverter controlled compressor

은 터어빈식 유량계(turbine type flow meter)를 팽창밸브 직전의 역관에 설치하여 제측하였다.

모든 온도 및 유량은 데이터 로거(data logger)의 입력을 RS-232C 직렬 통신으로 PC에 전송한 다음 디스켓에 저장하여 제어값으로 사용하였다. 전자 팽창밸브는 PID 제어에 의해 스텝핑 모터로 그 개도를 조절하였으며, 압축기는 PC에 내장된 A/D 컨버터(PC812 Board)의 D/O(Digital Out)을 이용하여 별도의 드라이버를 거쳐 On/Off 제어 및 인버터 회로를 이용하여 회전수를 제어하였다.

모형 룸의 크기는 1m³이고, 덕트 내부에 증발기를 설치하여 환에 의하여 공기가 순환되도록 하였다. 모형 룸 내부에는 14kW의 환 히터(fan heater)를 설치하여 냉방 부하로 하였다.

본 연구에서는 압축기의 회전수 제어를 하지 않았을 때와 인버터를 이용한 회전수 제어(모형룸의 온도 제어)를 하였을 때에 대하여 실험을 하였으며, 실험 내용은 다음과 같다.

- 압축기의 회전수를 제어하지 않은 경우

- 온도식 팽창밸브와 전자 팽창밸브(PID 제어 및 PI 제어)에 대한 증발기 과열도 제어시 각 팽창밸브의 성능 비교

- PID 제어와 PI 제어시 전자 팽창밸브의 증발기 과열도 제어 성능 비교

- PI 제어시 I 변수가 전자 팽창밸브를 이용한 증발기의 과열도 특성에 미치는 영향

- 인버터에 의한 압축기 회전수 제어 및 모형룸의 온도 제어를 할 경우

- PI 제어시 I 변수가 전자 팽창밸브를 이용한 증발기의 과열도 특성에 미치는 영향

- 인버터 냉동 시스템의 실내 온도 제어 성능 평가

2.2 전자 팽창밸브의 구조

본 연구에 사용한 전자 팽창밸브의 구조는 Fig2에 나타내었다. 시판되고 있는 전자 팽창밸브는 본 실험 목적상 사용이 매우 힘들므로, 니들 밸브와 스텝핑 모터를 커플링(coupling)으로 결합시켜 전자 팽창밸브를 제작하여 사용하였다.⁹⁾ 스텝핑 모터¹⁰⁾는 2상 여자 방식, 12V 20Ω, 1.8°/step을 사용하였으며, 구동 전원은 +12V이다.

Fig.3에 제작한 전자 팽창밸브의 밸브 개도에

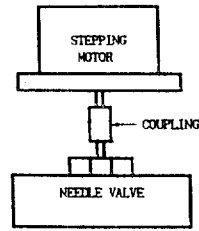


Fig.2 Electronic expansion valve driven by stepping motor

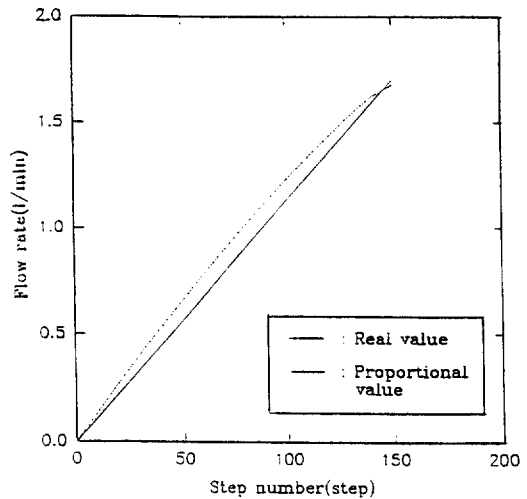


Fig.3 Flow rate as a function of the step number of stepping motor

따른 유량 특성을 조사한 실험 결과를 나타내었다. 실측치가 직선 비례식과 거의 일치되고 있기 때문에, 제작한 전자 팽창밸브는 본 실험 목적에 맞는 충분한 유량 제어 특성을 가지고 있다는 것을 알 수 있다.

3. 제어 이론

전자 팽창밸브의 제어는 프로세스 제어(Process control)에 가장 많이 사용하는 PID 제어, 즉, 비례(Proportional), 적분(Integral), 미분(Differential) 제어를 사용하였다. PID 제어 블록 선도는 Fig4와 같다.

제어량(제어 대상의 현재값)을 피드백하여 목표치와 비교한 편차를 PID 제어식에 입력하여, 그

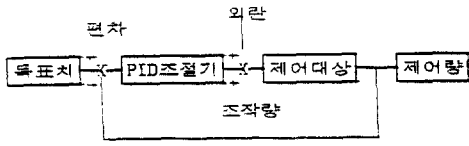


Fig.4 PID control block diagram

결과에 의한 조작량과 외란에 의한 조작량을 더하여 제어 대상에 가한다. 이러한 동작을 매 sampling time마다 반복한다.

제어에 사용한 식은 다음과 같다.¹²⁾

P 동작(비례 동작)에 의한 조작량 M_p 는

$$M_p = K_p \times e \quad (1)$$

I 동작(적분 동작)에 의한 조작량 M_i 는

$$M_i = K_p \times \frac{1}{T_i} \int e \, dT \quad (2)$$

D 동작(미분 동작)에 의한 조작량 M_d 는

$$M_d = K_p \times T_d \frac{de}{dT} \quad (3)$$

PID 동작(3항 동작)에 의한 조작량 $M_{p,i,d}$ 는

$$\begin{aligned} M_{p,i,d} &= M_p + M_i + M_d \\ &= K_p \left(e + \frac{1}{T_i} \int e \, dT + T_d \frac{de}{dT} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

로 된다. 식 (4)를 디지털 표현으로 고쳐 쓰면, k 회 sampling time에서의 조작량 $M(k)$ 는

$$\begin{aligned} M(k) &= K_p \left[e(k) + \frac{T_s}{T_i} \sum e(k) \right. \\ &\quad \left. + \frac{T_d}{T_s} (e(k) - e(k-1)) \right] \end{aligned} \quad (5)$$

PID 변수의 실정은 스텝 응답법을 이용하였다.

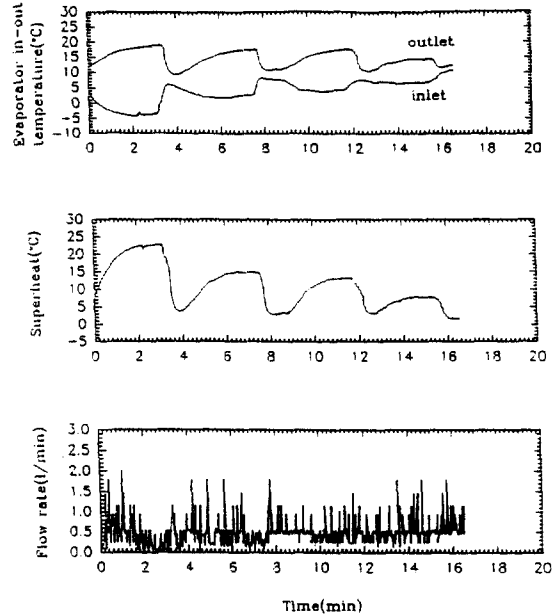


Fig.5 Experimental results for evaporator superheat control using TEV

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 온도식 팽창밸브를 이용한 증발기 과열도 제어

온도식 팽창밸브에 대한 실험 결과를 Fig.5에 나타내었다. 온도식 팽창밸브의 경우, 약 4분 주기의 긴 헌팅(hunting: 제어량이 목표치의 상하로 진동하는 현상)이 발생되며, 최초 과열도의 진폭은 약 15°C이며, 16분 경과 후에는 약 5°C로서 다소 줄어드는 경향을 나타내지만, 대체로 불안정한 상태가 계속되었다. 또한, 고압측인 수액기 직후에 설치된 sight glass내에서 관측된 냉매의 유동은 기포류 상태이며, Fig.5의 냉매 유량 변화에 나타나 있는 것과 같이 냉동 시스템이 불안정한 상태로 운전됨을 알 수 있다.

4.2 전자 팽창밸브를 이용한 증발기 과열도의 PID 제어

Fig.6~Fig.10은 전자 팽창밸브를 사용하여 냉매 유량 제어를 하였을 때의 시간에 따른 증발기 입·출구의 온도, 과열도 및 냉매 유량 변화를 나타낸

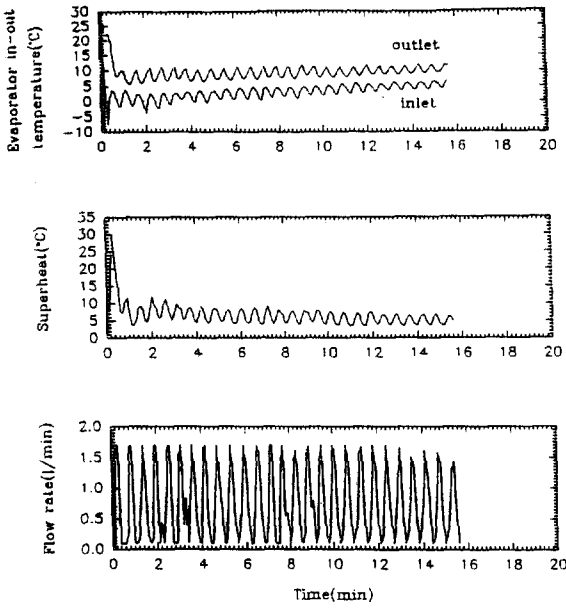


Fig.6 Experimental results of PID control of evaporator superheat using EEV ($K_p=1.5$, $T_i=400$ (sec), $T_d=20$ (sec), $T_s=6$ (sec))

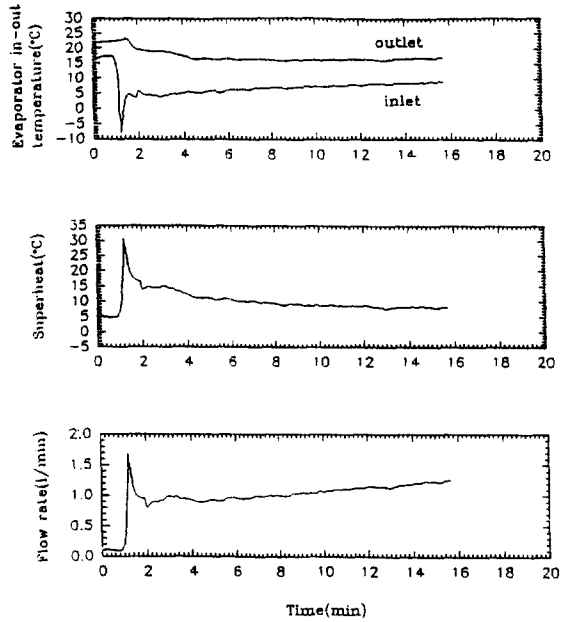


Fig.8 Experimental results of PI control of evaporator superheat using EEV ($K_p=1.5$, $T_i=600$ (sec), $T_s=6$ (sec))

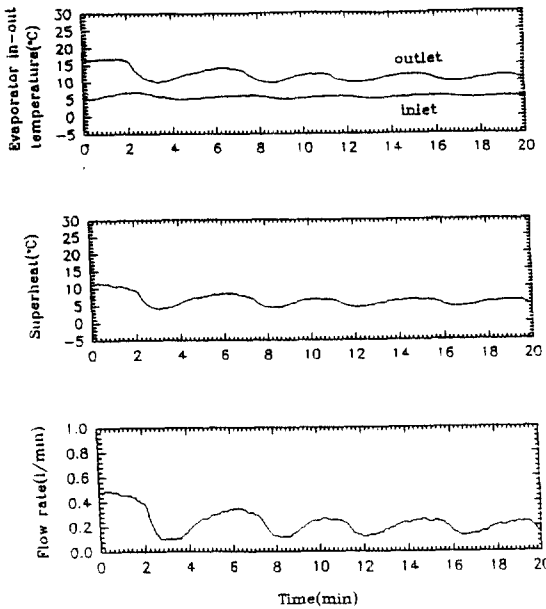


Fig.7 Experimental results of PI control of evaporator superheat using EEV ($K_p=1.5$, $T_i=300$ (sec), $T_s=6$ (sec))

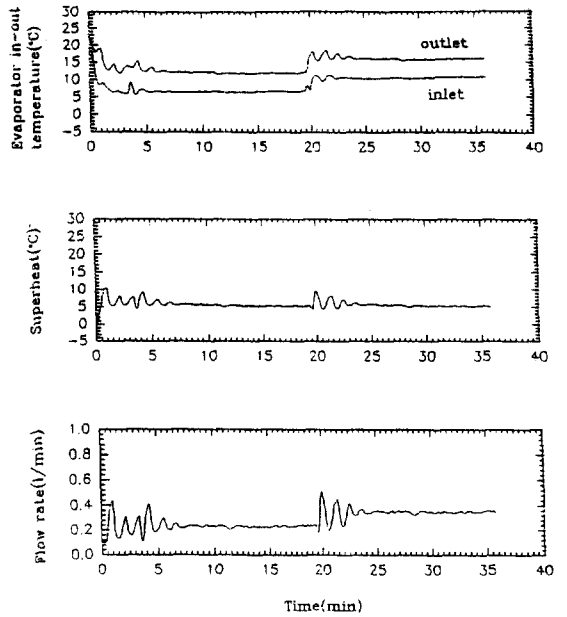


Fig.9 Experimental results of PI control of evaporator superheat using EEV ($K_p=1.5$, $T_i=400$ (sec), $T_s=6$ (sec))

것이다. 본 실험에서, 압축기 기동시 팽창밸브의 개도는 항상 전폐 상태로 하였다.

Fig.6은 $K_p=1.5$, $T_i=400(\text{sec})$, $T_d=20(\text{sec})$, $T_s=6(\text{sec})$ 로 하였을 때의 측정 결과이다. 이 경우, 기동 후 약 20초까지는 과열도가 약 30°C 로 급상승하였다. 이것은 기동시 팽창밸브가 전폐 상태에서 순간적으로 부분 개방되었기 때문이다. 또한, D 동작에 의한 팽창밸브 개도 조작량이 과열도 변화량에 대해 대단히 민감하게 반응하였기 때문에 설정한 과열도에 도달하지 못하고 주기 30초, 진폭 5°C 의 작은 헌팅이 발생되었다고 생각되며, 냉매 유량도 불안정한 상태를 보이고 있다.

4.3 전자 팽창밸브를 이용한 증발기 과열도의 PI 제어

D 동작이 증발기 과열도 제어를 불안정하게 하는 요소이므로, Fig.7~Fig.10에서는 PI 동작만을 사용하여 제어를 하였다.

Fig.7은 식 (5)에서 D 동작을 생략하고 PI 동작만을 사용한, $K_p=1.5$, $T_i=300(\text{sec})$, $T_s=6(\text{sec})$ 일 때의 측정 결과이다. 이때, PID 동작에서 D 동작의 생략으로 인한 밸브 개도 조작량의 감소를 보상하기 위해 $T_i=300(\text{sec})$ 으로 설정하여 밸브 개도 조작량을 다소 크게 하였다. 이 경우 증발기 입·출구 온도 변화가 Fig.6 보다 작았으며, 특히, 증발기 입구 온도 변화는 매우 작았다. 이것은 D 동작의 생략으로 인해서 밸브 개도 변화가 크지 않았기 때문이다. 그러나, 과열도는 주기 4분, 진폭 3°C 의 헌팅이 발생하였다. 이것은 T_i 의 감소로 인하여 밸브 개도 변화가 커졌기 때문이라고 생각된다(식 (5) 참조). 냉매 유량 변화는 Fig.6에 비하여 안정되었다.

Fig.8은 $K_p=1.5$, $T_i=600(\text{sec})$, $T_s=6(\text{sec})$ 일 때의 측정 결과이며, Fig.7과는 반대로 I 변수를 증가시켰을 경우이다. 시스템은 전체적으로 안정적이나, 과열도 목표치인 5°C 까지 접근하지 않고, 약 15분 경과후에는 과열도가 7°C 정도로써 목표치에 도달되는 시간이 매우 늦었다.

1분 경과 후 증발기 입구 온도가 급격히 저하하면서 과열도가 30°C 까지 상승하였으나, 이것은 팽창밸브 개도가 최초 전폐 상태에서 순간적으로 부분 개방되었기 때문이라고 생각된다.

Fig.9는 $K_p=1.5$, $T_i=400(\text{sec})$, $T_s=6(\text{sec})$ 일 때의

측정 결과를 나타낸 것이다. 압축기 기동 후 약 5분후에 목표치인 과열도 5°C 에 도달하였고, 계속적으로 목표치에서 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 의 안정성을 유지하였다. 또한, 증발기의 부하를 증가시킨 경우에도 약 3분 경과 후 목표치에 도달하여 안정을 유지하였다. 이것은 Fig.7과 Fig.8에서 사용한 T_i 의 중간값을 사용한 결과이고, 가장 적당한 I 변수로 생각된다.

Fig.10은 $K_p=1.5$, $T_i=500(\text{sec})$, $T_s=2(\text{sec})$ 일 때의 측정 결과이다. Fig.6~Fig.9는 모두 sampling time이 6초였으나, Fig.10은 sampling time의 단축에 의한 과열도의 목표치 도달 시간을 단축시키기 위해 2초로 설정하였다. 또한, 시스템의 불안정성을 보완하기 위해 $T_i=500(\text{sec})$ 으로 I 변수를 다소 크게 설정하였으나, 주기 2분, 진폭 4°C 의 헌팅이 발생하였다.

전자 팽창밸브를 이용한 냉동 장치의 증발기 과열도를 PID 제어한 실험 결과로부터, 각각의 P, I, D 변수가 전체 냉동 시스템에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다. 또한, 용량이 다른 냉동 시스템에서는 P, I, D 변수를 변경하여야 한다. 그러나, 대량 생산하는 냉장고, 에어컨 등에서는 단지 몇 회의 실험으로 적절한 P, I, D 변수를 설정할 수

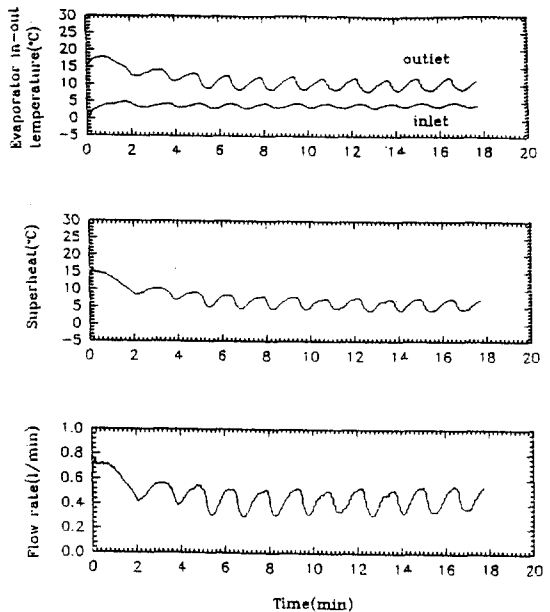


Fig.10 Experimental results of PI control of evaporator superheat using EEV ($K_p=1.5, T_i=500(\text{sec}), T_s=2(\text{sec})$)

있기 때문에, 동일 부품에는 동일한 P, I, D 변수를 적용할 수 있고, 따라서 대량 생산이 가능하게 된다. 또한, P, I, D 변수를 자동 추적하는 auto-tuning 기법을 잘 활용하면 어떠한 냉동 시스템에서도 P, I, D 변수를 자동 추적하여 안정적인 과열도 제어가 가능하다고 생각된다.

전자 팽창밸브는 온도식 팽창밸브보다 고가이나 액분리기(Accumulator) 등의 냉동 부품을 감소시킬 수 있고, 냉동 장치에 있어서 다른 안전 장치도 증발기 과열도 제어에 통합하여 제어 비용을 절감할 수 있다. 또한, 전자 팽창밸브를 인버터용 냉동·공조기에 적용하면, 그 시스템의 성능 향상이 기대된다.

4.4 전자 팽창밸브를 인버터 공조기에 적용하였을 경우 증발기 과열도 PI 제어

Fig.11 및 Fig.12는 압축기에 인버터를 부착하여 냉동 시스템을 가변적으로 운전하였을 경우이며, 모형 룸의 온도를 20℃로 유지하도록 PI 제어하였을 때에, 전자 팽창밸브를 이용한 증발기의 과열도 PI 제어에 관한 실험 결과이다.

Fig.11은 $K_p=1.5$, $T_i=400(\text{sec})$, $T_s=6(\text{sec})$ 일 때의 측정 결과로써, 모든 운전 기간중 과열도는 주기 2분, 진폭 10℃의 심한 헌팅이 발생하였다. 또한, 냉동 시스템의 불안정한 상태 운전 때문에 실내 온도도 약간의 변동을 보이고 있다.

정속 운전시 가장 안정된 변수값은 $T_i=400(\text{sec})$ 이었지만, 이와 같은 냉동 시스템의 불안정한 운전이 발생한 원인으로는 냉동 시스템의 용량이 인버터에 의해 변화하여 T_i 값이 작았기 때문이라고 생각된다.

Fig.12는 $K_p=1.5$, $T_i=700(\text{sec})$, $T_s=6(\text{sec})$ 때의 측정 결과이다. 냉동 시스템은 약 7분 정도의 심한 헌팅을 일으킨 후 안정을 유지하였다. 따라서, 인버터를 이용한 가변 용량 시스템의 증발기 과열도 PI 제어시, 본 실험에서는 $T_i=700(\text{sec})$ 이 가장 안정된 값임을 알 수 있다.

이상의 실험 결과를 통하여, 증발기 과열도 PI 제어시에는 정속 운전시 및 가변 운전시 모두 I 변수가 냉동 시스템의 안정화된 운전을 위한 매우 중요한 요소임을 알 수 있었다.

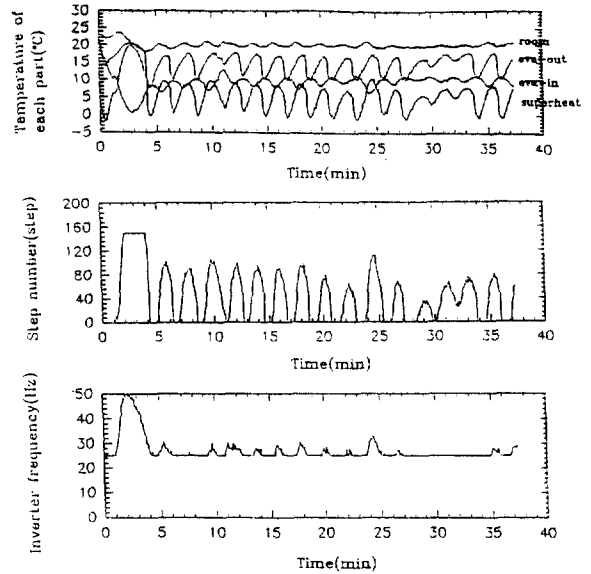


Fig.11 Experimental results of PI control of evaporator superheat using EEV when room temperature is controlled by inverter
Stepping motor : $K_p=1.5$, $T_i=400(\text{sec})$, $T_s=6(\text{sec})$
Inverter : $K_p=1.5$, $T_i=50(\text{sec})$, $T_s=6(\text{sec})$

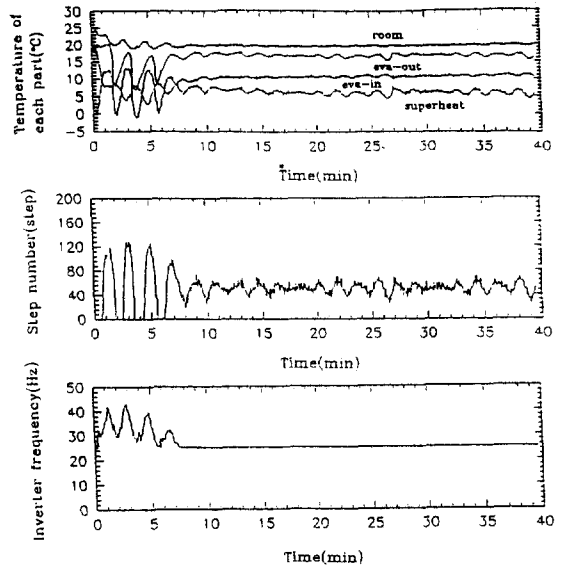


Fig.12 Experimental results of PI control of evaporator superheat using EEV when room temperature is controlled by inverter
Stepping motor : $K_p=1.5$, $T_i=700(\text{sec})$, $T_s=6(\text{sec})$
Inverter : $K_p=1.5$, $T_i=50(\text{sec})$, $T_s=6(\text{sec})$

5. 결 론

참 고 문 헌

냉동·공조 장치용 전자 팽창밸브의 유량 제어 및 증발기 출구의 과열도 제어 특성에 관한 실험적 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 온도식 팽창밸브의 경우, 과열도의 offset값만을 상쇄시키고, 냉매 유량 변화의 게인(gain)은 조정되지 않기 때문에, 시스템 기동 직후에 과열도 변화는 주기 4분, 진폭 15°C로 매우 불안정한 운전이 계속되었다. 안정적인 운전 상태에 도달될 때 까지는 약 16분 정도가 소요되었으며, 이 경우에는 주기 4분, 진폭 약 5°C의 긴 헌팅이 발생하였다.

2) 전자 팽창밸브의 경우, PID 제어보다 PI 제어가 증발기 출구의 과열도 제어시 더욱 안정적이었다. PID 동작의 경우에는 D 동작으로 인하여 팽창밸브의 개도 조작량이 과열도 변화량에 대해서 매우 민감하게 반응하기 때문에 설정한 과열도에 도달되지 못하고, 시스템이 불안정하였다.

PI 동작은 PID 동작에 비해 시스템이 매우 안정적이며, 기동후 약 3분 이내에 과열도 목표치에 도달하였다. 이때의 각 변수의 최적치는 $K_p=1.5$, $T_i=400(\text{sec})$, $T_d=6(\text{sec})$ 였다.

3) 인버터로 냉동 시스템을 가변적으로 용량 제어하여 모형실내 온도 제어를 한 경우, 최적 I 동작값은 $T_i=700(\text{sec})$ 였으며, 시스템 기동후 약 7분 정도에서 안정화되었다. 이때, 실내 온도 제어성은 매우 우수하였다.

4) 증발기 과열도 제어를 할 경우, 온도식 팽창밸브보다 전자 팽창밸브가 성능면에서 매우 우수하였다. 전자 팽창밸브 사용시에는 PID 제어보다 PI 제어가 유리하며, PI 제어시에도 T_i 값 및 sampling time이 시스템의 안정성에 미치는 영향이 크다는 것을 알 수 있었다.

후 기

본 연구의 수행에 도움을 주신 첨단유체공학 연구센터(AFERC)의 관계자들에게 감사사를 표합니다.

1. Nowotny S., 1991, "Recent progress in micro electronics and their applications in refrigeration and air conditioning", Int. J. Refrig, Vol.14, pp.140-147.
2. Takahashi S., 1986, "Inverter room air conditioner", Refrigeration, Vol.61, No.701, pp.249-252.
3. Fujimaki S. & Tanaka T., 1986, "Inverter room air conditioners", Refrigeration, Vol.61, No.701, pp.253-257.
4. Higuchi K., 1986, "Evaporator control systems", Refrigeration, Vol.61, No.701, pp.223-230.
5. Yasuda H., 1986, "Evaporator superheat control", Refrigeration, Vol.61, No.701, pp.244-248.
6. Kimura N., 1986, "Electric expansion valves", Refrigeration, Vol.61, No.701, pp.231-238.
7. Kimura N., 1992, "REFCON electronic expansion valve and controller system", Refrigeration, Vol. 67, No.774, pp.423-430.
8. Takasi Miyata, 1986, "Valve control by personal computer", Refrigeration, Vol.61, No.701, pp.281-285.
9. Hanzawa R., 1986, "Application of industrial electronic expansion valve", Refrigeration, Vol.61, No. 701, pp.271-273.
10. 도서출판 세운 편집부역, 1992, "스테핑 모터의 제어 회로 설계", pp.9-125.
11. 도서출판 세운 편집부역, 1985, "스테핑 모터의 활용 기술", pp.8-125.
12. 트랜지스타技術編集部, 1990, "溫度, 濕度 센サ活用ハンブツグ, CQ出版社, pp.146-174.