



# 工學碩士 學位論文

# 상태공간 모델을 이용한 공작기계용 압축기 가변속형 냉각기의 최적 제어

Optimum Controller Design Based on State Space Model of a Compressor Variable Speed Cooler for Machine Tools



## 釜慶大學校 大學院

冷凍空調工學科

## 金相浩

### 工學碩士 學位論文

# 상태공간 모델을 이용한 공작기계용 압축기 가변속형 냉각기의 최적 제어

Optimum Controller Design Based on State Space Model of a Compressor Variable Speed Cooler for Machine Tools



# 釜慶大學校 大學院

冷凍空調工學科

#### 金相浩

# 金 相 浩의 工學碩士 學位論文을 認准함



목 차

Abstract	 iii
List of tables	 iv
List of figures	 · v
Nomenclature	 vi



4.2 실험 방법	40
제5장 실험 결과 및 고찰	42
5.1 실험 결과 및 분석	42
5.2 고찰	48
제6장 결 론	50
참고문헌	52
학술대회 발표 논문 List	55
Appendix	56

#### Optimum Control Method Based on State Space Model of a Compressor Variable Speed Cooler for Machine Tools

Kim Sang-Ho

Department of Refrigeration and Air-conditioning Engineering Graduate School, Pukyong National University

#### Abstract

In this paper the control method of compressor variable speed(CVS) is deal as the main study. The CVS system is possible to satisfied demand of high speed, high precision and high efficiency. Input variables of this system are compressor speed and opening angle of EEV, and the output variables are outlet temperature and superheat. Therefore, this system is multi-input multi-output(MIMO) system. Generally, the PID control method or fuzzy method are used to control the CVS system. The PID control method is widely used to control cooler system. However, the CVS system is considered as single-input single-output(SISO) system. The fuzzy control methods have merits in easy to control and easy to apply based on expert experiences. However, it was hard to get precise control performance and the control performance was depended on expert ability. In addition, the energy consumption. is not considered by both methods above. Therefore, the optimum control method is proposed to control the CVS system in this paper. This optimum control method is based on state space model, so the model can deal with MIMO system. In addition, this method can achieve optimum control by using evaluation function that variables are control error and input energy.

To implement the proposed system, state space model of the CVS system is designed firstly. Then the state space model expanded to servo system for dealing with model uncertainty. Finally, the optimum gain was decided by using evaluation function. Furthermore the proposed control method is checked by experiments of starting characteristic, changing control late, and changing heat load.

#### List of tables

Table 1	Characteristics of the each control methods	2
Table 2	Specification of a test unit	38
Table 3	Experimental conditions	38



# List of figures

Fig.	1.1	Schematic diagram of a water cooler	1
Fig.	1.2	Schematic diagram of each control method	5
Fig.	2.1	Transfer function model	12
Fig.	2.2	Response of outlet temperature	13
Fig.	2.3	Response of superheat	14
Fig.	2.4	State feedback model	15
Fig.	2.5	State space model with state feedback	18
Fig.	2.6	Simulation results of state feedback	20
Fig.	2.7	Schematic diagram of servo system	21
Fig.	2.8	Simplified system of servo system	23
Fig.	3.1	Simulation results of compressor system	31
Fig.	3.2	Simulation results of EEV system	32
Fig.	3.3	Simulation results for considering modeling error	36
Fig.	4.1	Control system of a water cooler	37
Fig.	5.1	Effect of superheat and compressor speed on refrigeration capacity	42
Fig.	5.2	Temperature control result of starting operation	43
Fig.	5.3	Temperature control result under heat load variation	44
Fig.	5.4	Test results about starting characteristic	45
Fig.	5.5	Test result with temperature set point changing	46
Fig.	5.6	Test result with heat load changing	47

#### Nomenclature



#### 제1장 서론

#### 1.1 연구 배경

최근 공작기계는 자동화와 더불어 고속화, 정밀화 및 고효율화가 한층 요구되고 있다. 하지만, 공작기계의 고속화로 인해 가공 열부하가 급증하 고 있으며, 이러한 열부하는 공작물의 전체 변형의 80%를 차지하고 있 다. 따라서 정밀한 공작물의 가공을 위해서는 가공 열부하의 제거가 필 수적이다<sup>(1),(7)-(9)</sup>. 특허, 정밀 공작물에 대한 요구 정밀도는 수 µm 이내의 오차이며 주요 금속의 열팽창계수는 철(Fe) 12.3µm/℃, 구리(Cu) 16.5µm /℃, 니켈(Ni) 13.3µm/℃ 등으로, 요구되는 공작물의 정밀도를 맞추기 위해 서는 공작 부위의 온도 변화가 목표값의 ±0.1℃의 허용오차 안에서 제어 되어야 한다. Fig. 1.1은 공작기계와 냉각기의 개념도를 나타낸 것이다.



Fig. 1.1 Schematic diagram of a water cooler.

Fig. 1.1에서 공작기계 가동 시 열부하가 발생하며, 이러한 열부하를 제 거하기 위해 냉각기에서 일정한 온도의 냉각수가 공급된다. 공작 부위의 열부하를 흡수하여 온도가 상승한 냉각수는 탱크로 회수되고 펌프에 의 해 재순환된다.

일정한 온도의 냉각수를 공급하기 위한 냉각기의 다양한 제어 방법이 있으며, 이 중 대표적인 제어 방법으로는 시스템 On-Off 제어, 핫가스 바 이패스(Hot-gas Bypass; HB) 제어, 압축기 가변속(Compressor Variable Speed; CVS) 제어가 일반적이다. 다음 Table 1에 각 제어 방식의 특징에 대해 간단히 나타내었다.

 Table 1
 Characteristics of the each control methods

Component	On-Off	HB	CVS
Manipulated variable	System power	EEV	Compressor
wariipulateu variable			EEV
Structure	Simple	Simple	Complicate
Energy consumption	High	Middle	Low
Control precision	±1°C	±0.1 °C	±0.1 °C

시스템 On-Off 제어 방식은 냉동 능력의 제어를 위해 압축기의 전원을 제어하는 시스템으로 제어기의 구성이 매우 간단하다는 장점이 있다. 하 지만 압축기의 반복적인 기동 동작으로 인하여 소비전력이 크고, 압축기 의 수명이 짧으며, 특히 최근 공작기계에서 요구되는 정밀도인 ±0.1℃ 이내로 제어하기가 매우 어려운 시스템이다. HB 제어방식은 시스템의 냉각능력을 제어하기 위해 압축기 출구측의 핫가스를 이용하는 방식이다<sup>(3)</sup>. 부분 부하 시 압축기 출구측의 핫가스를 증발기 입구측으로 바이패스하여 냉각능력을 조절한다. HB 제어방식은 On-Off 방식에 비해 에너지 효율이 높고, 제어 정도 또한 ±0.1℃ 정도로 최근 요구되는 정도에 부합하는 시스템이다. 하지만 HB 방식은 압축기 가 항상 정속 운전하는 시스템으로, 부분 부하 시의 에너지 절약은 어렵 다는 단점이 있다.

CVS 제어 방식은 냉각능력을 제어하기 위해 인버터를 이용하여 압축 기 회전수를 제어하는 방식이다. 특히, 이 방식은 주 에너지 소모원인 압 축기의 회전수를 가변함으로써 냉각능력을 제어하므로, 부분 부하 시 에 너지를 절약할 수 있는 시스템이다. 압축기 회전수의 변화에 따른 냉매 질량유량의 변화는 냉각능력의 변화 뿐 아니라, 시스템의 과열도도 변화 시킨다. 과열도가 너무 높게 되면 시스템의 효율이 나빠지고, 과열도가 너무 낮아지면 액압축 등 압축기 파손의 위험이 생긴다. 따라서 CVS 시 스템은 냉각기 출구측의 온도 뿐만 아니라, 과열도의 제어도 필요한 다 변수 제어 시스템이다.

다음 Fig. 1.2는 시스템의 On-Off, HB 제어, CVS 제어 방식에 대한 개 넘도를 나타낸 것이다.

제1장 서 론



(b) Hot-gas bypass system



본 논문의 연구 대상인 CVS 시스템에 대한 기존의 연구 중, CVS 시 스템의 동작 특성에 관한 연구로는, Lee 등의 안버터 타입 냉각기를 이 용하여 온도를 제어 했을 경우의 특성에 관한 연구<sup>(2)</sup>가 있으며, Beak 등 은 외기 온도 변화에 따른 특성<sup>(4)</sup>, 전자팽창밸브 개도에 따른 특성<sup>(5)</sup>, 압 축기 회전수 변화에 따른 특성<sup>(10),(11)</sup> 등 CVS 시스템의 각 변수의 변화에 따른 시스템의 특성에 대해 분석하였다. 위에 언급한 논문들은 CVS 시 스템의 특성에 관한 논문들로 본 논문의 주 목적인 다변수 제어시스템의 제어 방법과는 거리가 먼 논문이다. CVS 시스템의 제어 방법에 관한 연 구로는 Byun 등의 고정밀 온도 제어를 위한 PI 및 피드포워드 제어<sup>(15)</sup>와 Li 등의 수학적 방법을 통한 각 제어 변수의 비간섭 제어에 대한 연구<sup>(6)</sup> 및 fuzzy 제어<sup>(14)</sup> 등이 있다. PID 제어법의 경우, 각 제어 변수의 전달함 수를 각기 구하여 제어계를 구성해야 한다. 이러한 구성 방법으로 인해 각 제어 변수의 전달함수를 구하기가 번거롭고, 제어계의 확장성과 유연 성이 떨어질 뿐만 아니라, 설정한 게인이 최적의 성능을 보장하지 못한 다는 단점이 있다. Li 등의 비간섭 제어의 경우는 시스템의 모델링이 매 우 복잡하다는 단점을 가진다. fuzzy 제어의 경우는 수학적 모델을 구하 지 않고, 엔지니어의 숙련도에 의존하는 방법으로, 데이터베이스가 많을 경우에 적용하기 유리하지만, 정밀한 제어가 어려우며, 엔지니어의 숙련 도에 따라 제어 성능이 달라진다는 단점이 있다.

따라서 본 논문에서는 MIMO 시스템에 대한 기존의 제어법의 단점을 보완하고자 상태공간 모델에 기반한 최적제어를 적용한다. 상태공간 모 델에 기반한 최적제어의 적용을 통해 모든 제어 변수를 하나의 제어계로 구성한다. 이를 통해 기존의 전달함수에 기반한 제어법의 단점을 보완하 여 확장성, 유연성을 가지는 제어기를 설계할 수 있으며, 수학적 모델링 을 이용함으로써 제어기의 체계적인 설계를 통해 일정한 제어 성능을 얻 을 수 있다. 또한, 제어 오차와 입력 에너지를 변수로 가지는 평가함수를 통해 주어진 조건(냉각기 출구온도 과도상태 300s 이하)하에서 최적제어 를 달성 할 수 있다.

본 논문에서 제안하는 제어 방법인 냉각 시스템에 상태공간 모델을 이

용한 선행 연구로는 Park 등의 실내 온도 제어를 위한 상태 궤환 제어기 개발에 관한 연구가 있다<sup>(16)</sup>. 이는 실내의 각 구간에 대한 온도 상태를 모델링한 연구로 본 논문에서 제안하는 MIMO 시스템에 대한 상태공간 모델의 적용과는 다른 연구이며, 입력 에너지를 고려하는 최적제어 개념 은 적용되지 않은 논문이다.

따라서 본 논문에서는 MIMO 시스템인 CVS 시스템에 상태공간 모델 을 적용하여 동특성 모델의 표현 및 제어기 설계의 편이성을 얻고, 주어 진 조건하에서 제어 오차와 입력 에너지를 모두 고려한 최적제어를 달성 하고자 한다.

01 1

#### 1.2 연구 목적

본 논문에서는 공작기계용 냉각기의 제어 방법 중, 고정도의 제어와 에너지 절약 효과를 동시에 가지는 CVS 시스템의 제어법에 주목한다. MIMO 시스템인 CVS 시스템의 효율적인 제어를 위해 상태공간 모델을 유도하고, 제어 모델이 가지는 불확실성에 대응하기 위한 서보 제어법과 제어 정도와 입력 에너지를 동시에 고려하기 위한 최적제어법을 제안한 다. 제어 정도와 입력에너지를 동시에 고려한 최적제어를 달성하기 위해 제어 정도와 입력에너지를 변수로 갖는 평가함수를 설정하고, 각 변수의 가중치를 설정하여 설계자가 원하는 조건에서 최적제어를 달성 할 수 있 도록 한다. 즉, 본 논문의 주요 연구 목적은 최근 산업현장에서 주목받고 있는 CVS 시스템의 최적제어를 달성하는 것이다.

따라서 본 논문에서는 주어진 제어 모델을 서보 제어계로 확대하고, 최적제어를 위한 평가함수를 설정한다. 시뮬레이션을 통해 평가함수의 각 가중치 의미를 분석하고, 주어진 조건에서 최적제어를 달성할 수 있 도록 한다. 최종적으로 실험을 통해 제안한 제어법이 최근 요구되는 냉 각기 출구온도를 정상 상태 오차 ±0.1℃ 이내, 이 때의 과열도를 정상 상태 오차가 ±1.5℃ 이내로 제어할 수 있음을 확인한다.

#### 1.3 연구 내용

본 논문에서는 다변수 제어 시스템인 CVS 방식의 제어를 위해 상태공 간 모델에 기반한 최적제어방식을 적용하고자 한다. 우선, CVS 시스템에 최적제어의 적용을 위해 제어대상의 상태공간 모델을 구하고, 구해진 모 델을 서보 시스템으로 확장하였다. 또한, 제어 오차와 입력 에너지를 변 수로 가지는 평가함수를 설정하고, 각 변수의 가중치를 달리하여 주어진 조건 하에서 최적의 제어를 달성할 수 있도록 하였다. 또한, 시스템의 확 장을 통해 생길 수 있는 적분누적현상을 제거하기 위해 제어 로직에 안 티 와인드업 기능을 추가하였다. 최종적으로, 실제 실험을 통해 제안한 설계법의 성능을 검증하였다.

본 논문은 전체 6장으로 구성되었으며, 각 장의 개요는 다음과 같다. 제1장에서는 연구의 배경과 전체 내용에 대해 개괄적으로 설명하였다. 제2장에서는 본 논문의 연구 대상인 CVS 시스템의 제어 방법과 상태 공간 모델을 이용한 제어 로직에 대해 설명한다.

제3장에서는 평가함수의 각 가중치 변화에 따른 제어 변수의 변화를 시뮬레이션을 통해 확인하고, 이를 통해 최적제어 게인을 찾는 방법에 대해 설명한다.

제4장에서는 제안한 제어칙을 검증하기 위한 실험 장치와 실험 방법에 대해 설명한다.

제5장에서는 제안한 제어칙을 통해 얻어진 실험결과에 대한 고찰을 하

였다.

제6장에서는 본 연구를 통해 얻어진 결과를 분석하고, 최종 결론을 도 출한다.



#### 제2장 상태공간 모델에 기반한 압축기 가변속

#### 시스템의 최적제어계

#### 2.1 압축기 가변속 시스템

CVS 시스템은 공작기계의 열부하를 제거하기 위한 냉각기의 제어 방 법 중, 고정도의 제어성능과 에너지 절약을 동시에 얻을 수 있는 제어 방법이다. CVS 시스템은 냉동 능력을 조절하기 위해 압축기의 회전수를 변화시켜 냉각기에 흐르는 냉매의 질량유량을 조절한다. 냉매의 질량 유 량 변화는 냉동 능력의 변화 뿐만 아니라, 과열도를 변화시킨다. 과열도 의 변화는 냉각기의 성능 저하 혹은 압축기의 파손 위험을 야기하므로, 이를 방지하기 위해 전자팽창밸브(Electrical Expansion Valve; EEV)의 개 도(opening angle)를 제어함으로써 과열도도 동시에 제어해야 한다. 즉, CVS 시스템의 제어 변수는 냉각기 출구온도와 과열도이며, 이를 위한 각각의 조작 변수는 압축기 회전수와 EEV의 개도이다. 제어대상의 압축 기는 3상 유도전동기에 의해 구동되는 로터리식이며, EEV의 개도는 스 텝모터에 의해 변화된다. 압축기의 회전수 제어를 위한 인버터는 V/f = Constant 타입의 범용 오픈루프 제어 방식이며, 냉동 능력의 제어 가 필요하면 콘트롤러로부터 지령을 받아 적절한 주파수를 압축기로 보 내고 이를 통해 압축기의 속도가 가변된다.

#### 2.2 상태공간 모델링

다변수 제어 시스템인 CVS 시스템의 최적제어를 위해 상태공간 모델 을 유도한다. 본 논문의 주안점은 제어대상에 대한 엄밀한 수학적 제어 모델의 이론적 유도가 아닌 상태공간 모델이 주어졌을 때의 제어기 설계 에 있다. 따라서, 본 논문에서의 제어대상의 수학적 모델은 예비실험을 통해 얻어진 실용적인 전달함수를 이용하여 구한다. Fig. 2.1은 전달함수 모델의 블록 다이어그램을 나타낸 것이며, 실제 시스템에서는 압축기 회 전수 변화에 대한 냉각기 출구온도와 과열도의 전달함수, EEV의 개도 변화에 대한 냉각기 출구온도와 과열도의 전달함수로 총 4개의 전달함수 가 필요하다.



Fig. 2.1 Transfer function block diagram

Fig. 2.2와 Fig. 2.3은 예비실험을 통해 얻어진 결과로써, 다양한 조건에 서 수차례 반복 실험한 결과 중 일례이다.









(b) case 1(160step $\rightarrow$ 150step)

Fig. 2.3 response of superheat versus changing opening angle of EEV.



구해진 전달함수를 이용하여 식 (3)의 관계식을 통해 등가의 상태공간 모델을 얻었으며, 얻어진 제어 대상의 상태방정식과 출력방정식은 각각 식 (4), 식 (5)와 같다.

$$G(s) = C(sI - A)^{-1}B$$
(3)

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \tag{4}$$

$$y(t) = Cx(t) \tag{5}$$

$$A = \begin{pmatrix} -0.0435 & 0\\ 0 & -0.1333 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 1 & 0\\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$
$$C = \begin{pmatrix} -0.0004 & 0\\ 0 & -0.0253 \end{pmatrix}$$



Fig. 2.4는 상태공간 모델의 선도로 상태행렬(state matrix) *A*, 입력행렬 (input matrix) *B*, 출력행렬(output matrix) *C*에 대한 내용을 그림으로 나타 낸 것이다. 여기서 *A*(2×2), *B*(2×2), *C*(2×2)는 제어대상 시스템의 사양 (dimension)으로부터 결정되는 고유한 상수 매트릭스이며, 본 논문에서는 예비 실험을 통해 구해진 전달함수로부터 *A*, *B*, *C*를 구하였다.

식 (4)는 압축기 회전수와 EEV 개도를 제어입력으로, 냉각기의 출구 수온 및 증발기 입·출구 온도차에 해당하는 과열도를 상태 변수(state variable)로 하여 이들의 동특성을 나타내는 상태방정식이다. 또한, 식 (5) 는 식 (4)의 상태 변수에 의해 결정되는 최종 출력값을 나타내는 출력방 정식이다.



#### 2.3 최적 서보 제어계

본 논문에서는 CVS 시스템의 효율적인 제어를 위해 최적 서보 제어 방법을 제안한다. 최적 서보 제어기는 구해진 상태공간 모델이 가지는 불확실성에 대응하기 위한 서보 제어기와 평가함수를 이용하여 제어 정 도와 입력 에너지를 동시에 고려하는 최적제어를 동시에 사용하는 방식 이다.

우선, 본 논문의 제어 대상은 공작기계용 냉각기이며, 이러한 냉각 시 스템은 일반적으로 제어 모델에 불확실성을 내포하고 있다. 따라서 상태 공간 모델에 일반적인 레귤레이터(regulator)만을 이용해서는 지령값에 추 종하는 시스템을 만들 수 없다. 그러므로 본 논문에서는 구해진 상태공 간 모델을 서보 제어계로 확대하고, 이를 통해 제어 모델의 불확실성에

본 논문에서의 제어 대상인 상태방정식 (4)와 출력방정식 (5)로 표현되 는 상태공간 모델은 제어대상 자체이며, 임의의 지령값에 추종하는 서보 시스템을 나타내고 있는 것은 아니다. 일반적으로 시스템의 정상 및 과 도 특성을 개선하기 위해 Fig. 2.5와 같이 주어진 상태공간 모델에 상태 피드백 게인(state feedback gain) *K*를 추가한다.



이 식을 상태 방정식 (4)에 대입하면 다음과 같은 식 (7)이 얻어진다.

$$\dot{x} = (A - BK)x(t) + Br(t) \tag{7}$$

$$x(t) = \exp(A - BK)t \cdot x(0) + Br(t)$$
(8)

여기서 식 (7)은 x(t)에 대한 미분방정식이고, 식 (8)은 이 방정식의 해이 다. 식 (8)을 통해, 상태 피드백 게인 K를 조절하면 x(t)의 응답을 조절할 수 있다는 것을 알 수 있다. 하지만 이러한 조절이 가능한 경우는 모델 이 이상적이고, 외란의 영향을 받지 않으며, 불확실성을 포함하지 않는 경우에 한하며, 현실적으로는 상태 피드백 게인만으로 원하는 응답을 얻 을 수 없다.

Fig. 2.6은 주어진 상태공간 모델에 상태 피드백만을 추가하였을 경우 의 시뮬레이션 결과이며, (a)는 냉각기 출구온도의 변화, (b)는 과열도의 변화를 나타낸 것이다.

11 10



(b) Superheat response

Fig. 2.6 Simulation results of state feedback.

Fig. 2.6에 나타낸 시뮬레이션은 기준이 되는 전달함수의 DC 게인 및 시 정수에 각각 ±10%, ±20%의 모델링 에러를 가정하였다.

Fig. 2.6을 통해 모델의 오차는 정상 상태에 영향을 미치는 것을 알 수 있으며, 상태 피드백 게인의 추가만으로는 모델의 불확실성에 대응할 수 없다는 것을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 주어진 시스템을 Fig.
2.7과 같은 서보 시스템으로 확장하였다.

Fig. 2.7에서 점선 내부는 상태 방정식 (4)와 출력 방정식 (5)로 표현되 는 시스템이고, 외부는 서보 제어기 구성을 위한 상태 피드백 게인 K<sub>1</sub>, 서보 게인 k<sub>2</sub> 및 제어 목표의 오차를 누적하기 위한 적분기로 구성된 확 대계이다.



Fig. 2.7 Schematic diagram of servo system.

Fig. 2.7에서 서보 확대계를 포함한 전체 계의 새로운 입력 u(t)는 식 (9) 와 같고, 지령값과 최종 출력값의 차인 제어 오차는 식 (10)과 같이 정의 할 수 있다.

$$u(t) = -K_1 x(t) + k_2 \xi(t)$$
(9)

$$\dot{\xi}(t) = r(t) - y(t)$$
 (10)

식 (4)와 (5) 그리고 식 (9)와 (10)을 하나의 행렬식으로 결합하면 식 (11) 과 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{\xi}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ \xi(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} r(t)$$
(11)

임의의 시각 t에서의 각 변수들 값과 정상 상태(steady state)에서의 이들 값의 차인 제어 오차는 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.  $\begin{bmatrix} \dot{x}(t) - \dot{x}(\infty) \\ \dot{\xi}(t) - \dot{\xi}(\infty) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) - x(\infty) \\ \xi(t) - \xi(\infty) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} [u(t) - u(\infty)]$ (12)

각 변수들의 제어 오차를 식 (13)과 같이 정의하면 식 (12)는 식 (14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{cases} x_{e}(t) = x(t) - x(\infty) \\ \xi_{e}(t) = \xi(t) - \xi(\infty) \\ u_{e}(t) = u(t) - u(\infty) \end{cases}$$
(13)

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_e(t) \\ \dot{\xi}_e(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_e(t) \\ \xi_e(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_e(t) \end{bmatrix}$$
(14)

Fig. 2.7은 식 (14)를 통해 다음 Fig. 2.8과 같이 간단히 표현할 수 있다.



여기서 각 항은 다음과 같다.  $A_m = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix}, B_m = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}, K_m = \begin{bmatrix} K_1 \\ k_2 \end{bmatrix}^*, \dot{e}(t) = \begin{bmatrix} \dot{x}_e(t) \\ \dot{\xi}_e(t) \end{bmatrix}$ 

기호 '\*'는 행렬의 전치를 나타낸다. 서보계의 새로운 제어입력  $u_e(t)$ 는 Fig. 2.8에서 보듯이 식 (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$u_e(t) = -K_m e(t) \tag{15}$$

식 (14)의 제어 오차를 식 (16)과 같이 정의하면, 식 (14)는 식 (17)과 같이 간결하게 나타낼 수 있다.

$$e(t) = \begin{bmatrix} x_e(t) \\ \xi_e(t) \end{bmatrix}$$
(16)

$$\dot{e}(t) = A_m e(t) + B_m u_e(t) \tag{17}$$

여기서  $u_e(t)$ 는 식 (15)와 같으므로, 식 (17)은 식 (18)과 같이 된다.

$$\dot{e}(t) = (A_m - B_m K_m) e(t)$$
(18)

식 (18)은 제어 대상의 과도 상태와 정상 상태의 오차에 관한 동차 미분 방정식이다. 즉, 식 (18)로부터  $K_m$ 을 적절히 조절하면, 과도 및 정상 상 태오차를 적절히 조절하여 원하는 동특성을 갖는 서보 제어 시스템을 설 계할 수 있음을 알 수 있다. 즉, 시스템의 최적제어를 달성하기 위해서는 서보 확대계의 조절기  $K_1(K_{c1}, K_{v1})$ 과 서보게인  $k_2(k_{c2}, k_{v2})$ 를 적절히 결정 해야 됨을 알 수 있다.

#### 제3장 제어기 설계

#### 3.1 최적제어기 설계

본 논문에서는 앞서 기술한  $K_1$ ,  $k_2$  두 게인을 적절히 결정하기 위해 최적제어 설계법을 적용한다. 이 설계법은 제어 오차 및 입력 에너지를 변수로 하는 평가함수를 설정한 후, 각 변수의 가중치를 달리하여 주어 진 조건에서 평가함수를 최소화 하는 제어 게인을 찾는 방법이다. 서보 시스템으로 확대된 계의 최적제어를 위한 평가함수  $J_m$ 은 식 (19) 와 같이 정의한다.

# $J_m = \int_0^\infty \left( e^* Q_m e + u_e^* R_m u_e \right) dt \tag{19}$

여기서 피적분항의 제1항은 제어 오차, 제2항은 입력 에너지를 각각 나 타낸다. 여기서 Q<sub>m</sub>과 R<sub>m</sub>은 각각 전체 계의 오차 추종 가중치와 입력 에너지 가중치 행렬로서 제어대상 시스템의 설계 요구 조건에 따라 달리 설정할 수 있다. 각 가중치는 시스템의 제어 오차에 대한 요구 정도 및 투입 가능한 에너지 입력 한계를 고려하여 설계할 수 있으며, 이렇게 결 정된 게인을 갖는 시스템은 제어 오차와 입력 에너지에 관해 설정한 요 구 조건을 최적으로 만족하는 시스템이 된다.

Qm과 Rm을 설정하면, 설정된 가중치에서 최소의 평가함수를 가지는

입력  $u_e$ 를 가지는 최적 게인  $K_m$ 을 얻을 수 있다. 다음 유도 과정을 통해  $Q_m$ 과  $R_m$ 을 설정하면 평가함수를 최소로 하는 최적 게인  $K_m$ 을 구할 수 있음을 알 수 있다.

식 (15)를 식 (19)에 대입하면 식 (20)을 얻을 수 있다.

$$e^* W_m e = -e^* [(A_m - B_m K_m)^* P + P(A_m - B_m K_m)]e$$
(22)

여기서 P는 양의 한정(positive-definite)인 Hermite 행렬 또는 실대칭행렬 (real symmetric matrix)이며,  $A_m - B_m K_m$ 이 안정행렬이라면 식 (22)를 만 족시키는 행렬 P가 반드시 존재한다<sup>(17)</sup>.

식 (20)으로 주어진 2차 최적제어 문제의 해를 구하는 과정은 다음과

같다. 우선, 양의 한정인 Hermite 행렬 또는 실대칭행렬인 R<sub>m</sub>을 선정하 면, R<sub>m</sub>은 식 (23)과 같이 쓸 수 있다.

$$R_m = T^* T \tag{23}$$

여기서 T는 비특이행렬(non-singular matrix)이다. 식 (23)을 식 (22)에 대입 하면 식 (24)가 얻어진다.

여기서 F는 F = TK<sub>m</sub> - (T\*)<sup>-1</sup>B<sup>\*</sup><sub>m</sub>P이다. 식 (15)에서 J<sub>m</sub>을 최소화시키기 위해서는 식 (25)의 F가 최소가 되어야 하며, 이 식은 음수가 아니므로 식 (26)과 같이 될 때, 0이 되어 최소로 된다<sup>(17)</sup>.

$$TK_m = (T^*)^{-1} B_m^* P (26)$$

즉, 최적제어를 달성하기 위한 게인 행렬  $K_m$ 은 식 (27)과 같이 된다.

$$K_m = T^{-1}(T^*)^{-1}B_m^* P = R_m^{-1}B_m^* P$$
(27)

한편, 2차 최적제어 문제의 제어입력은 식 (27)을 식 (15)에 대입하여 식 (28)과 같이 구해진다.



결국 최적제어 설계를 위해 가중치  $Q_m$ ,  $R_m$ 을 설정하면 축소된 리카티 방정식 (29)에서 P를 구할 수 있고, 이를 식 (27)에 대입하면 최적제어를 위한 게인 행렬  $K_m$ 을 구할 수 있다.

추가적으로, 서보 확대계에 포함된 적분기가 오차 누적현상을 일으킬 수 있으므로, 이에 대응하기 위해 제어 로직에 안티 와인드업 기능을 추 가하였다.

제3장 제어기 설계

#### 3.2 최적제어를 위한 Q, R의 설계

본 논문에서는 최적 게인을 결정하기 위해 평가함수의 제어 오차 가중 치  $Q_m$ 과 입력 에너지  $R_m$ 을 변화시키며 각 출력값의 변화를 분석하고, 주어진 조건에서 최적의 제어를 달성할 수 있는 가중치를 설정한다.

우선 각 가중치의 차원은 다음 식 (30)과 같다.

$$Q_{m} = \begin{pmatrix} q_{11} & 0 \\ 0 & q_{22} \end{pmatrix}, R_{m} = (r)$$
(30)  
이를 평가함수 (19)에 대입하면 다음 식 (31)과 같다.  
$$J_{m} = \int_{0}^{\infty} (q_{11}x_{e}^{2} + q_{22}\xi_{e}^{2} + ru_{e}^{2})dt$$
(31)

식 (31)로부터 설계자가 원하는 평가함수를 설정하기 위해서는 3개의 가중치(q<sub>11</sub>, q<sub>22</sub>, r)를 설정해야 한다. x<sub>e</sub>는 정상 상태 오차, ξ<sub>e</sub>는 과도 상태 오차, u<sub>e</sub>는 에너지 투입량에 대한 항이므로, q<sub>11</sub>은 정상 상태의 오차를 적게 하는 가중치이고, q<sub>22</sub>는 과도 상태 시간을 짧게 하는 가중치, r은 에너지 투입량을 적게 하는 가중치가 된다.

각 가중치를 결정하기 위해 각 제어 변수의 특징을 분석하였다. 제어 대상의 제어 변수는 냉각기 출구측의 온도와 과열도이다. 우선, 냉각기 출구측의 온도 제어를 위한 조작변수는 압축기 회전수이며 이는 에너지 투입량과 밀접한 관계가 있다. 반면에 과열도의 제어를 위한 조작변수는 EEV의 개도량이며, 이는 에너지 투입량과는 직접적인 관계가 없다. 또 한, 과도 시 과열도가 짧은 시간 동안 변화하는 것은 COP에 큰 영향을 미치지 않으므로 엄밀한 과열도 제어가 요구되지 않는다. 따라서 냉각기 의 출구측 온도 제어를 위한 가중치 설정 시에는 과도 오차의 가중치인  $q_{22}$ 의  $q_{11}$  및 r에 대한 상대적 크기에 주목하며, 과열도 제어를 위한 가 중치 설정 시에는 r의  $q_{11}$  및  $q_{22}$ 에 대한 상대적 크기에 주목한다.

 Fig. 3.1은 냉각기 출구온도의 제어를 위해 q11과 r을 고정한 후, q22의

 값을 100, 250, 500, 750, 1000으로 변화시켜 시뮬레이션 한 결과이다.

 Fig. 3.1의 (a)는 냉각기 출구측 온도, (b)는 이때의 압축기 회전수이며,

 (c)는 냉각기 출구온도의 정착시간과 투입 에너지의 관계이다.



(a) Outlet temperature response



(c) Relation settling time with input energy



Fig. 3.1 (a) 와 (b)의 시뮬레이션 결과를 통해, q<sub>22</sub>가 커질수록 입력 에 너지가 커지며 정착시간이 짧아지는 것을 확인할 수 있다. Fig. 3.1의 (c) 는 (a)와 (b)를 통해 알 수 있는 정착시간과 입력 에너지량의 관계이다. 본 실험에서는 냉각기 출구측 온도의 정착시간 허용 오차를 300s로 설정 하여 422를 500으로 설정하였다.

다음 Fig. 3.2는 EEV 시스템의 가중치를 결정하기 위하여  $Q_m$ 을 고정 한 후,  $R_m$ 을 달리하며 시뮬레이션한 결과이다.



(b) Opening angle of EEV reference

Fig. 3.2 Simulation results for deciding weight of the EEV system.

Fig. 3.2의 (a)는 출력값인 과열도의 변화, (b)는 입력값인 EEV 개도 변 화이다. EEV 시스템과 압축기 시스템의 다른점은 EEV 개도량이 커지는 것과 에너지의 사용량은 직접적인 관계가 없다는 점이다. 하지만, EEV 개도의 급격한 변화는 EEV를 파손시킬 수 있으므로, EEV 시스템의 가 중치는 *R<sub>m</sub>*의 비율에 따른 EEV 개도의 변화 속도에 주목한다. 시뮬레이 션 결과를 통해 알 수 있듯이, *R<sub>m</sub>*의 비율이 커질수록 EEV의 개도 변화 가 늦어지며, 과열도의 정착지간도 길어짐을 알 수 있다.



#### 3.3 시뮬레이션을 통한 제어기 검증

Fig. 3.3은 제안한 제어 방법의 성능을 확인하기 위해 시스템의 DC 게 인 및 시정수에 ±10%, ±20%의 모델링 오차가 있을 경우에 대한 시뮬레 이션 결과이다. Fig. 3.3의 (a)는 냉각기 출구온도 응답, (b)는 압축기 회 전수 지령값, (c)는 과열도 응답, (d)는 EEV의 개도 지령값이다. 시뮬레이 션 결과로부터, 제안한 제어 방법은 제어대상의 동특성 모델이 일부 오 차를 가지고 있더라도 제어 변수들을 목표치에 엄밀히 추종시킬 수 있음 을 알 수 있다. 모델의 불확실성으로 인한 DC 게인 및 시정수의 모델링 오차는 과도 상태에 영향을 일부 미치지만, 정상 상태에는 영향을 미치 지 않음을 확인하였다.

11 10

제3장 제어기 설계



(b) Frequency reference

제3장 제어기 설계



Fig. 3.3 Simulation results of proposed control method under model error.

# 제4장 실험 장치 및 실험 방법

#### 4.1 실험장치

Fig. 4.1은 실험장치의 구성도이며, Table 2와 Table 3은 실험장치의 구 체적인 사양 및 실험 조건을 각각 나타낸다.



Fig. 4.1 Control system of a water cooler.

Table 2 Specifications of the test unit

Component	Note
Compressor	Rotary type, 1[HP]
Condenser	Air-cooled fin and tube type
Evaporator	Plate heat type exchanger
Refrigerant	R-22

Table 3 Experimental conditions

Item	Note
Water flow rate	22.5[ <i>l</i> /min]
Ambient air temperature	30[℃]
Control period	1[sec]
Target temperature	25[℃]

실험장치에서 제어 대상은 공작기계용 냉각기이며, 제어 유닛은 랩뷰 (LabVIEW) 시스템이다. 제어 대상의 조작 변수는 냉동 능력의 제어를 위 한 압축기 회전수와 과열도의 제어를 위한 EEV 개도이며, 각 조작 변수 의 조작기로는 인버터와 EEV 드라이버이다. 랩뷰 시스템은 온도 센서인 T-type 열전대(thermocouple)로부터 온도 정보를 수집하고, 설계된 제어 로 직에 따라 조작량을 계산하여 출력한다. 이 때, 출력되는 제어 지령값은 압축기의 회전수 제어를 위한 인버터 주파수와 EEV 개도 제어를 위한 펄스 스텝수이다. 냉각기의 운전 상태를 파악하기 위해 냉각기의 출구 및 시스템 각 주요 구성부의 온도, 압축기 회전수 및 EEV 개도 정보를 랩뷰 시스템을 통해 수집하였다. 공작기계의 열부하를 대신하기 위해 최 대 3kW 용량의 전기 히터를 설치하여 필요시 그 크기를 부하 제어기로 가변하였다. 또한 냉각기의 출구 온도 설정값은 공작기계용 냉각기의 특 성을 고려하여 25℃로 정하였고, 과열도는 정특성 실험 결과를 토대로 9℃로 설정하였다.



#### 4.2 실험방법

설계된 제어 방법의 타당성을 검증하기 위해 실험은 크게 두 가지로 구분, 정특성 및 동특성 실험을 실시하였다. 우선, 정특성 실험을 통해 과열도의 설정 근거 및 동특성 실험 결과의 타당성 근거를 확보하였고, 다음, 동특성 실험으로는 기동 특성, 지령 변경, 부하 변경 실험을 통해 냉각기 출구 온도와 과열도가 정상 상태 허용오차(냉각기 출구 온도: ±0.1℃, 과열도: ±1.5℃) 범위 이내에서 제어됨을 확인한다.

우선 정특성 실험에서는 압축기 회전수 변화에 따른 냉각능력의 변화 를 확인하기 위해 냉각기 입구 온도를 일정하게 고정한 후, 냉각기 출구 온도와 압축기 회전수 관계를 확인한다. 다음으로, EEV 개도 변화에 따 른 과열도의 변화를 확인하기 위해 시스템에 인가되는 부하를 일정하게 고정한 후, EEV 개도를 변화시키며 그 때의 과열도 변화를 확인한다. 마 지막으로, 과열도의 설정 근거를 확보하기 위한 실험은 압축기 회전수를 40, 60, 80Hz로 각각 고정한 후, 각 회전수에서 과열도를 변화시키며 시 스템의 냉각능력을 확인한다.

시스템의 동특성을 조사하기 위해 기동 특성, 지령 변경, 부하 변경 실 험을 진행한다. 기동 특성 실험은 냉각기를 처음 기동하였을 때를 가정 한 실험으로서, 시스템의 주변 온도가 공작기계 사용 외부의 온도와 같 은 30℃일 때를 초기 온도로 하여 출력값의 변화를 분석한다.

지령 변경 실험의 경우, 목표 온도를 변경했을 때를 가정한 실험으로,

초기 지령인 25℃에서 냉각기 출구측의 온도가 정상 상태를 찾은 후, 제 어 지령을 24℃로 변경했을 때의 출력값 변화를 분석한다.

마지막으로, 부하 변경 실험은 공작기계의 가공 작업의 진행에 따라 부하가 달라지는 상황을 고려한 실험으로, 시스템에 2kW의 열부하를 인 가하여 정상 상태를 찾은 후, 전기히터를 2.5kW로 스텝상으로 변동시켜 냉각기 출구측의 온도와 과열도의 변화를 분석한다.



# 제5장 실험 결과 및 고찰

#### 5.1 실험 결과 및 분석

Fig. 5.1은 압축기 회전수 변화에 따른 냉각기 출구측의 온도를 확인하 기 위하여 실행한 정특성 실험결과이다. 외기온도를 30℃, 과열도를 9℃ 로 고정한 후, 냉각기 입구로 들어오는 냉각수의 온도를 일정하게 고정 하여 실험하였다.



Fig. 5.1 Static experimental results of compressor frequency

Fig. 5.2는 EEV 개도 변화에 따른 시스템의 과열도 변화를 알아보기 위한 실험 결과이다. 외기온도 30℃, 압축기 회전수 60Hz, 시스템에 인가 되는 열부하를 2kW로 고정하여 실험하였다.



Fig. 5.3은 시스템의 최적 과열도 설정값을 찾기 위한 압축기 회전수별 과열도에 따른 냉각능력 정특성 실험 결과이다. 압축기 회전수(인버터 입력 주파수)가 변하더라도 과열도가 대략 9℃까지는 냉각능력의 감소가 거의 없음을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 과열도 지령값을 9℃로 설정하였다.



Fig. 5.3 Effect of superheat and compressor speed on refrigeration capacity.

다음은 시스템의 동특성 실험 결과이다. Fig. 5.4는 초기 기동시의 시 스템의 동특성, Fig. 5.5는 지령 변경시의 시스템 동특성, Fig. 5.6은 부하 변경시의 시스템 동특성에 관한 실험 결과이다.



(b) Starting characteristic of EEV system

Fig. 5.4 Test results about starting characteristic.



(b) Set point changing test result of EEV system

Fig. 5.5 Test result with temperature set point changing.



(b) Heat load changing test result of EEV system

Fig. 5.6 Test result with heat load changing.

#### 5.2 고찰

Fig. 5.4는 초기 정지 상태에서 기동을 겸한 제어 지령값 추종 실험 결 과이다. 2kW의 부하 및 초기 온도 30℃에서 제어 시, 기동 초기에는 설 정값과 출력값의 온도차가 매우 커서 Fig. 5.4 (a)에서와 같이 압축기의 최대 회전수인 90Hz에서 지속적으로 운전됨을 볼 수 있다. 시간이 지남 에 따라 출구 온도가 점차 낮아져 설정값인 25℃ 부근이 되면 압축기의 회전수가 점차 감소하면서 설정값으로 수렴하도록 제어가 되고 있음을 볼 수 있다. 또한, 압축기 회전수의 변화로 인한 과열도의 변화는 EEV의 개도 변화를 통해 허용오차 이내에서 제어되고 있음을 Fig. 5.4 (b)에서 확인할 수 있다. 실험 결과를 통해 정상 상태 오차는 냉각기 출구 온도 가 ±0.1℃, 과열도가 ±1.5℃ 이내로 제어되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5.5는 출구온도 지령값을 25℃에서 24℃로 변경하였을 때의 제어 결과이다. 지령값 변경 시 증발기 출구측의 온도가 목표값과 1℃의 큰 온도차가 생기며, 이 오차를 제거하기 위해 압축기 회전수가 90Hz로 급 격히 변화되는 것을 Fig. 5.5 (a)에서 볼 수 있다. 기동 특성 실험과 마찬 가지로 출구측의 온도가 목표값인 24℃에 접근하면 압축기 회전수가 줄 어들며, 지령값에 수렴함을 Fig. 5.5 (a)에서 확인할 수 있으며, 압축기 회 전수의 급격한 변화로 인한 과열도의 변화는 EEV의 개도 제어를 통해 설정값에 수렴하는 것을 Fig. 5.5 (b)에서 확인할 수 있다.

Fig. 5.6은 시스템이 열부하량 2kW에서 정상 상태를 찾은 후, 약 900

초 근방에서 열부하량을 2.5kW로 스텝상으로 변경했을 때의 실험 결과 이다. 실험 결과를 통해 부하가 갑자기 증가하더라도, 압축기 회전수가 증가하여 냉각기 출구 온도가 허용오차인 ±0.1℃ 이내에서 제어됨을 Fig. 5.6 (a)에서 확인 할 수 있으며, 압축기 회전수 변화로 인한 과열도의 변 화 역시, EEV 개도 제어를 통해 허용오차인 ±1.5℃ 이내로 제어됨을 Fig. 5.6 (b)를 통해 알 수 있다.



제6장 결 론

#### 제6장 결 론

본 논문에서는 공작기계용 냉각기의 제어 방법 중, 고정도의 제어성능 과 에너지 절약을 동시에 달성할 수 있는 CVS 시스템의 최적제어 방법 을 제안하였다. 다변수 제어 시스템인 CVS 시스템에 최적제어를 적용하 기 위해 상태공간 모델에 기반한 제어기를 설계하였다.

우선, 예비 실험을 통해 구한 실용적인 전달함수를 이용하여 CVS 시 스템의 상태공간 모델을 구했다. 다음으로, 냉각기와 같은 모델에 불확실 성을 포함하는 시스템에 대응하기 위하여 구해진 상태공간 모델에 서보 제어계를 구성하였다. 서보계의 구성을 통해 상태 피드백 게인 K<sub>1</sub>과 서 보 게인 k<sub>2</sub>의 조절로 오차의 과도 및 정상 상태를 제어할 수 있음을 확 인하였으며, 각 게인을 구하기 위해 최적제어 방식을 적용하였다. 또한, 주어진 조건하에서 최적제어를 달성하기 위해 제어 오차와 입력 에너지 를 변수로 가지는 평가함수를 설정하였고, 각 변수에 대한 가중치의 의 미를 분석하였다. 각 가중치를 달리한 시뮬레이션을 통해 주어진 조건 하에서 최적의 제어를 달성할 수 있는 최적 게인을 결정하였다. 최종적 으로 제안한 제어기의 성능을 평가하기 위해 기동 실험, 지령 변경 실험, 부하 변경실험을 실시하였으며, 제안한 제어기가 각 실험 조건에서 목표 값에 잘 수렴함을 보였다.

본 연구에서 얻은 주요 결과들을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 상태공간 모델에 기반한 제어계를 적용함으로써 모든 제어변수를 하나의 모델로 표현할 수 있으며, 이를 통해 제어계의 동특성 표 현, 제어기 설계를 복잡한 기존의 설계법에서 벗어날 수 있다. 또 한, 이후에 제어성능의 향상을 위해 증발기 및 응축기의 팬 모터 등을 제어변수로 간단히 확장 할 수 있다.
- (2) 주어진 시스템을 서보 시스템으로 확장하여 모델이 불확실성을 포 함하더라도 기동 시, 지령 변경 시, 부하 변경 시에 목표값에 잘 수렴함을 확인하였다.
- (3) 평가함수를 이용한 최적제어를 적용하여 주어진 조건하에서 제어 오차와 입력 에너지를 동시에 고려한 최적제어를 달성하였다.
- (4) CVS 시스템의 상태공간 모델이 불확실성을 포함하더라도 원하는 정상 상태를 얻기 위해 설계한 서보 시스템의 외부에 포함된 적분 기가 일으킬 수 있는 적분 누적현상에 대응하기 위해 제어 로직에 안티 와인드업 기능을 추가하였다. 이를 통해 과도 시간을 줄여 제

어 성능을 향상시킬 수 있었다.

이상의 결과들로 MIMO 시스템인 CVS 시스템에 상태공간 모델 기반 의 제어를 적용하여 제어 정도와 입력 에너지를 동시에 고려하는 최적제 어를 달성할 수 있음을 보였다.

#### 참고문헌

- S. W. Lee, H. K. Yeom and K. J. Park, 2009, Performance of Hot Gas Bypass Type Oil Cooler System, Journal of Korean Society for Precision Engineering, Vol. 26, No. 3, pp. 73-80(in Korean).
- 이상호, 이찬홍, 박천홍, 2003, 인버터 타입 오일냉각기의 온도제어 특 성에 관한 연구, 한국공작기계학회 추계학술대회 논문집, pp. 233-236.
- S. M. Beak, J. H. Choi, J. Y. Byun, C. G. Moon, H. S. Lee, S. K. Jeong and J. I. Yoon, 2009, Characteristics of Temperature Control by Hot-gas Bypass Flow Rate on Industrial Water Cooler, Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 33, No. 8, pp. 1129-1136(in Korean).
- 4. S. M. Beak C. G.Moon, E. P. Kim, S. K. Jeong and J. I. Yoon, 2011, The Characteristic Study of Capacity Control of an Industrial Cooler Using an Inverter Compressor with Varing the Ambient Temperatures, Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 35, pp. 238-243(in Korean).
- S. W. Lee, H. K. Yeom, Performance of Thermal Error Controller to Minimize Thermal Deformation of Machine Tools, Journal of Korean Society for Precision Engineening, pp. 376-380(in Korean).
- H Li, S. S. You, J. I. Yoon, S. K. Jeong, 2008, An Empirical Model for Independent Control of Variable Speed Refrigeration System, Applied

Thermal Engineering, Vol. 28, pp. 1918-1924.

- 7. S. M. Beak, C. G. Moon, H. W. Kim, S. K. Jeong, J. I. Yoon, 2010, Characteristics of Capacity Control of Variable Speed Water Cooler with the Electronic Expansion Valve Open/Close Degree, Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 34, No. 2, pp. 282-288(in Korean).
- 8. H. K. Yeom, S. W. Lee, 2008, Performance Test of Gasby-pass Type Thermal Error Controller, ICCAS.
- J. H. Ahn, Y. J. Joo, I. Y. Cho, H. Kang, Y. C. Kim, J. M. Choi, 2009, An Experimental Study on the Performance Characteristics of a Heat Pump System in the Heating Operation Mode with the Hot Gas Bypass, SAREK, pp. 539-543(in Korean).
- Yaqub. M, Zubair S. M., Jameel-ur-Rehman Khan, 2000, Performance Evaluation of Hot-gas Bypass Capacity Control Scheme for Refrigeration and Air-conditioning Systems, Energy, Vol. 25, pp. 543-561.
- Yaqub. M, Zubair S. M., Khan S. H., 1995, Second-law-based Thermodynamic Analysis of Hot-gas Bypass, Capacity-control Schemes for Refrigeration and Air-conditioning Systems, Energy, Vol. 20, No. 6, pp. 483-493.
- 12. Y. M. Jung, J. Y. Byun, J. I. Yoon and S. K. Jeong, 2009, A Study on High Precision Temperature Control of an Oil Cooler for Machine

Tools Using Hot-gas Bypass Method, Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 33, No. 7, pp. 1003-1011(in Korean).

- S. M. Beak, C. G. Moon, J. I. Yoon, S. K. Jeong and E. P. Kim, 2011, The Characteristic of Capacity Control Using a Variable Speed Compressor in an Industrial Cooler, The Korean Society for Power System Engineering, Vol. 15, pp. 37-41(in Korean).
- 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 Engineering, Vol. 15, No. 2, pp. 61-69.
- 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, pp. 1067-1074.
- 16. S. H. Park and S. C. Shin, 2001, A Study on the Development of the Zonal Division Model and the State Feedback Controller for the Temperature Control of the Indoor Zone Via VAV Unit, Korean Journal of Air- Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 13, No. 10, pp. 947-959(in Korean).
- C. G. Kang, et al., 2010, Modern control engineering, 5th Edition, Kyobo, pp. 893.

# [학술대회 발표논문 List]

- S. H. Kim, D. B. Lee and S. K. Jeong, 2010, Comparison of System Performance on Hot-gas Bypass and Capacity Control in an Oil Cooler for Machine Tools, International Conference on Cooling and Heating Technologies.
- 김상호, 정석권, 2011, 상태공간모델을 이용한 공작기계용 냉각기의 고성능 제어기 설계, 대한설비공학회 하계학술발표대회 논문집, pp. 19-23.
- S. H. Kim, D. B. Lee and S. K. Jeong, 2010, Optimum Control of a Cooler Driven by an Inverter for Machine Tools, International Symposium on Advanced Engineering.

#### [학술지 게재논문 List]

- 변종영, 김상호, 정석권, 윤정인, 2011, PI와 피드포워드 제어를 이용한 공작기계용 오일쿨러의 핫가스 바이패스 방식 정밀 온도 제어, 설비공 학회논문집, Vol. 23, No. 2, pp. 111-119.
- 정석권, 김상호, 2011, 상태공간 모델링에 의한 공작기계용 수냉각기 의 최적제어기 설계, 설비공학회논문집, Vol. 23, No. 12, pp. 782-790.

# Appendix





<A1> 제어 프로그램(데이터 저장, 연산, 지령값 출력)



<A2> 프런트 패널(컨트롤 패널)



<A3> 제어 연산 프로그램 (압축기 회전수)



<A4> 제어 연산 프로그램 (EEV 개도)

#### 감사의 글

대학원에 들어오고 공부를 시작한지도 벌써 2년이 다 되어갑니다. 대 학원에 진학하며 낯설고 설렌 기분이 아직도 남아있는데, 벌써 졸업이라 는 것이 믿어지지 않습니다. 정말로 힘들고 어려웠던 대학원 생활이었지 만, 그만큼 배운 것도 많았고 보람된 시간이었다고 생각됩니다.

무엇보다도 먼저 저를 지도해주시고 이끌어주신 정석권 교수님께 진심 어린 감사와 존경의 마음을 전하고 싶습니다. 교수님의 세심한 지도와 물심양면의 지원이 없었다면 무사히 졸업할 수 없었을 것입니다.

졸업논문을 쓰는 동안 많은 어려움이 있었고 그때마다 도와주신 이동 훈 선배님 매우 감사합니다. 여러 방면으로 도와주신 금종수 교수님, 김 종수 교수님, 김동규 박사님, 백승문 선배님에게도 감사합니다. 힘들 때 마다 곁에서 많이 도와준 민수형, 민주형, 진우형, 지호형, 지원이, 원범 이에게 감사의 말을 전합니다. 또한, 실험실에서 일찍부터 실장을 맡아 고생한 단비, 실험에 문제가 생길 때마다 도와준 종영선배, 우진선배, 전 기와 영어에 대해 많은 도움을 준 wahyu, 실험 할 때마다 옆에서 많이 도와준 기학이, 저 때문에 고생 많았던 건붕이에게도 감사의 마음을 전 하고 싶습니다.

이제 졸업하면 또 다시 시작이 있겠지만, 석사과정을 하면서 얻은 경 험을 바탕으로 최선을 다해 목표했던 바를 이룰 수 있도록 하겠습니다. 2012년 1월 金 相 浩 拜上