



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學碩士學位論文

유전 알고리즘과 외란 관측기를 이용한
최적 서보 제어기 기반의 가변속
냉동시스템의 강인한 온도 제어

**Robust Temperature Control of Variable Speed Refrigeration System
Based on an Optimal Servo Controller Using Genetic Algorithm
and a Disturbance Observer**

2022年 2月

釜慶大學校大學院

冷凍空調工學科

吳幸林

工學碩士學位論文

유전 알고리즘과 외란 관측기를 이용한
최적 서보 제어기 기반의 가변속
냉동시스템의 강인한 온도 제어

**Robust Temperature Control of Variable Speed Refrigeration System
Based on an Optimal Servo Controller Using Genetic Algorithm
and a Disturbance Observer**

指導教授 鄭碩權

이 論文을 工學碩士學位論文으로 提出함.

2022年 2月

釜慶大學校大學院

冷凍空調工學科

吳幸林

吳幸林의 工學碩士 學位論文을 認准함.

2022年 2月 25日

主 審 工學博士 琴 鍾 洙 ①
委 員 工學博士 薛 成 勳 ①
委 員 工學博士 鄭 碩 權 ①

목 차

Abstract	iv
List of tables	vi
List of figures	vii
Nomenclature	viii
제1장 서 론	1
1.1 연구 배경 및 목적	1
1.2 연구 범위 및 내용	5
제2장 가변속 냉동시스템의 온도 제어	7
2.1 가변속 냉동시스템의 구성 및 제어	7
2.2 실험 장치의 구성 및 사양	10
2.3 동특성 실험을 통한 전달함수 모델링	12
제3장 최적 서보 제어기 설계 및 파라미터 최적화	17
3.1 상태 공간 모델링	17
3.2 최적 서보 제어 이론	17
3.3 유전 알고리즘에 의한 최적화 문제 정의	24
3.3.1 유전 알고리즘의 개요	25

3.3.2	유전 알고리즘의 기본 용어	25
3.3.3	유전 알고리즘의 표현	27
3.3.4	유전 알고리즘의 프로세스	27
3.4	유전 알고리즘을 이용한 하중 행렬의 최적화	29
제4장	강인한 온도 제어를 위한 외란 관측기 설계	32
4.1	외란 관측기 이론	32
4.2	Q-필터 설계	35
제5장	MATLAB 기반 시뮬레이션 결과 및 고찰	37
5.1	제어 성능 분석	37
5.1.1	시뮬레이션 조건 및 방법	37
5.1.2	최적화된 하중 행렬의 타당성 및 서보 제어 성능 분석	39
5.1.3	외란 관측기의 타당성 및 외란에 대한 강인성 분석	40
5.1.4	모델 불확실성에 대한 강인성 분석	42
5.2	제어기 설계 파라미터의 영향 분석	47
5.2.1	하중 행렬의 영향 분석	48
5.2.2	Q-필터 설계 파라미터의 영향 분석	50

제6장 실험 결과 및 고찰	52
6.1 실험 장치 및 실험 방법	52
6.2 제어기의 성능 검증 및 분석	53
6.2.1 최적 서보 제어 실험 및 결과 분석	53
6.2.2 외란 관측기를 갖는 최적 서보 제어 실험 및 결과 분석	56
6.2.3 잡음의 영향 분석	59
제7장 결 론	61
참고문헌	63
Appendix	67
학술지 게재 논문 및 학술대회 발표 논문 목록	77
감사의 글	78

Robust Temperature Control of Variable Speed Refrigeration System Based on an Optimal Servo Controller Using Genetic Algorithm and a Disturbance Observer

Oh Haeng-Rim

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

Abstract

Variable speed refrigeration systems (VSRSs) have been applied in different industrial and commercial fields because of their excellent energy saving performance and partial load response. A VSRS basically comprises a variable speed compressor, an electronic expansion valve (EEV), and heat exchangers. As all components of the system are connected to various pipes and valves, the system exhibits strong inherent nonlinear characteristics such as dead time in the operational ranges. Moreover, heat load fluctuates continuously. Thus, obtaining a practical linear nominal model and accurately controlling the target temperature is difficult. Even the sophisticated mathematical model used for VSRS (i.e., the high-order linear state space model) has many deficiencies when the controller is operating because of model uncertainties and disturbances including noise. For high dimensional models, accurately identifying the dynamic characteristics of VSRSs is a very laborious and tedious task. Therefore, a servo control method that resists model uncertainties and disturbances based on a practical and simple as possible model is required.

VSRS control systems generally belong to the class of a multi-input/multi-output (MIMO) system because they have two inputs and outputs to control the target temperature and superheat based on the rotation speed of the compressor and EEV opening angle. In terms of flexible access to multivariate MIMO systems and optimal control performance, applying the optimal control method based on the state space model is convenient.

Therefore, in this paper, a more practical, simple, and high performance optimal robust servo controller design is proposed; the proposed approach solves the problems of the conventional optimal servo controller design for VSRSs. First, the state space model used for designing the controller is derived from the transfer function, which is easily obtained through dynamic characteristic experiments near the operating point of the control object; fewer parameters that affect the model uncertainty must be identified, which facilitates modeling. Second, the controller is designed as a servo-type controller to follow strictly the target value on the step. In particular, the weighting matrix for the evaluation function, which is a crucial parameter for the design of an optimal controller, can be easily selected with a genetic algorithm without trial and error procedures. Finally, a disturbance observer (DOB) with a simple Q-filter compensates for disturbances, which makes the system resistant to disturbances and model uncertainties.

The proposed controller was verified through MATLAB-based simulations and experiments with a VSRS-based oil cooler system as the control object. Moreover, the robustness against disturbances and model uncertainties was assessed by comparing the results of the cases with and without DOB in detail.

List of tables

No.	Table name	Page
Table 2.1	Specifications of test unit	11
Table 2.2	Experimental data of dynamic characteristic for $G_e(s)$	15
Table 2.3	Experimental data of dynamic characteristic for $G_e(s)$	15
Table 2.4	Characteristic parameters obtained from experimental results	16
Table 3.1	Genetic operators of genetic algorithm	26
Table 3.2	Representations of chromosome in genetic algorithm	27
Table 3.3	Controller gains of optimal servo control system	31
Table 5.1	Conditions of simulations and experiments for each time period	38
Table 5.2	Response characteristics of the simulation with and without DOB	42
Table 5.3	Response characteristics of the simulation according to parameter variation	45
Table 5.4	Response characteristics of the simulation according to DOB application against parameter variation	47
Table 5.5	Response characteristics according to weighting matrix change	49
Table 5.6	The effects of DOB parameters on control performance	50
Table 6.1	Control system devices	52
Table 6.2	Experimental results of maximum transient error with and without DOB	57
Table A.3.1	Experimental data of dynamic characteristic for $G_{t1}(s)$	70
Table A.4.1	Experimental data of dynamic characteristic for $G_d(s)$	70

List of figures

No.	Figure name	Page
Fig. 2.1	Schematic of oil cooler system	7
Fig. 2.2	Block diagram of typical feedback control system with disturbance and noise	8
Fig. 2.3	Block diagram of dual-SISO feedback control system for VSRS	9
Fig. 2.4	Block diagram of state space model for MIMO system	9
Fig. 2.5	Experimental system for OCS	10
Fig. 2.6	Real experimental unit	11
Fig. 2.7	COP profile according to superheat	12
Fig. 2.8	Transfer functions for compressor and EEV	13
Fig. 2.9	Transfer function model by experiment at near operating point	14
Fig. 2.10	Experimental results for obtaining transfer function model	15
Fig. 3.1	Block diagram of state feedback control system	19
Fig. 3.2	Block diagram of optimal servo control system	23
Fig. 3.3	Flow chart of genetic algorithm	28
Fig. 3.4	Flow chart of genetic algorithm by MATLAB/Simulink	31
Fig. 4.1	Structure of disturbance observer	33
Fig. 5.1	MATLAB/Simulink program of optimal robust servo controller for simulations	37
Fig. 5.2	Simulation results of optimal servo controller	39
Fig. 5.3	Simulation results of optimal servo controller with and without DOB	41
Fig. 5.4	Simulation results to confirm robustness against model uncertainty	43
Fig. 5.5	Control input of compressor by optimal servo controller	44
Fig. 5.6	Simulation results of optimal servo controller with DOB against parameter variation	46
Fig. 5.7	Simulation results according to weighting matrix change	48
Fig. 6.1	MATLAB/Simulink program of designed controller for experiments	53
Fig. 6.2	Experimental results of optimal servo controller	54
Fig. 6.3	Experimental results of optimal servo controller with DOB	56
Fig. 6.4	Experimental result for disturbance compensation by DOB	58
Fig. 6.5	Simulation result for noise addition without DOB	60
Fig. 6.6	Simulation result for noise addition with DOB	60
Fig. A.2.1	GA solver of optimization tool of MATLAB	68
Fig. A.2.2	Plot functions of GA solver	69
Fig. A.3.1	Experimental result for interference transfer function $G_{i1}(s)$	69
Fig. A.4.1	Experimental result for heat load transfer function $G_d(s)$	70

Nomenclature

A, B, C	coefficient matrix	-
d, \bar{d}	disturbance	-
\hat{d}	estimated disturbance	-
\tilde{d}	dead time	s
e	control error	-
f_i	inverter frequency	Hz
G	transfer function	-
J	evaluation function	-
K_1	state feedback gain	-
K_2	servo gain	-
k	DC gain	-
n	noise	-
P	real plant model	-
P_n	nominal plant model	-
Q	state weighting matrix	-
\bar{Q}	Q-filter	-
R	control weighting matrix	-
r	reference, set value	-
s	complex variable	-
T_o	oil outlet temperature	°C
T_s	superheat	°C
t	time variable	-
u	control input	-
V_o	EEV opening angle	step
x	state variable	-
y	output variable	-
Δ	variation	-
v	relative degree	-
τ	time constant	s

Subscripts & Superscripts

a	augmented system	-
c	compressor	-
d	disturbance	-
e	EEV	-
i	interference	-
T	transpose	-

제1장 서론

1.1 연구 배경 및 목적

가변속 냉동시스템(Variable Speed Refrigeration System; VSRS)은 뛰어난 에너지 절약 성능과 부분 부하 대응 능력으로 산업 및 상업 전반에 적용되고 있다^{1~11)}. VSRS는 기본적으로 증기 압축 냉동시스템(Vapor Compression System; VCS)에 속하며 압축기 회전 속도 제어를 통해 냉매 질량 유량을 가변함으로써 부하에 대응하여 목표로 하는 온도, 압력, 용량 등을 효과적으로 달성한다. 이때 급격한 부하 변동으로 인해 압축기 회전 속도가 급격히 변하는 경우, 냉매 과다에 따른 액백(liquid back) 현상 또는 냉매 부족에 따른 과열 증기 압축으로 야기되는 COP(Coefficient Of Performance) 저하 문제가 발생할 수 있다. VSRS는 이러한 문제를 방지하기 위해 전자팽창밸브(Electronic Expansion Valve; EEV)의 개도를 조절하여 과열도(superheat)도 동시에 제어하고 있다. 이에 따라 VSRS는 가변속 압축기, EEV 및 열교환기(응축기, 증발기)로 구성되므로 다입·출력(Multi Input Multi Output; MIMO) 시스템에 속하며, VSRS의 제어기를 설계하는 것은 MIMO 시스템의 제어기를 설계하는 문제로 된다.

VCS 제어를 위한 다양한 제어법이 연구되었다¹²⁾. VCS의 제어법은 On/Off 제어 및 PID(Proportional-Integral-Derivative) 제어 등의 기존 제어(conventional control), 최적 제어인 LQR(Linear Quadratic Regulator), LQG(Linear Quadratic Gaussian) 등이 속하는 고급 제어(advanced control), 신경망(neural network) 제어 및 퍼지(fuzzy logic) 제어 등이 속하는 지능형 제어(intelligent control)로 크게 분류할 수 있다. 특히 VSRS를 대상으로 원하는 온도 제어 성능을 확보하기 위해서는 PID 제어^{13~15)}, 최적 제어^{16~24)}, 슬라이딩 모드(sliding mode) 제어^{6,25,26)}, H_{∞} (H-infinity) 제어²⁷⁾, 퍼지 제어^{7,9,11)} 등이 연구되었다. PID 제어의 경우 설계가 간단하고 유지

보수가 쉬우면서도 제어 성능이 양호하여 산업 현장에서 가장 널리 사용되고 있다. 그러나 PID 제어기 설계에 이용되는 VSRS 전달함수 모델 (transfer function model)의 불확실성(uncertainty), 외란(disturbance) 및 센서로 유입되는 잡음(noise)에 대한 제어계의 강인성 확보가 어려운 단점이 있다. 이러한 PID 제어법은 단일 입·출력 시스템인 SISO(Single-Input Single-Output) 시스템에 적합한 대표적 제어법으로, VSRS와 같은 MIMO 시스템에 적용하기에는 다소 번거롭다. VSRS의 2개의 입·출력을 고려하여 독립적인 dual-SISO 시스템으로 표현하여 PID 제어기를 설계할 수도 있다. 장차 시스템의 고효율화를 위해 열교환기의 팬(fan) 속도 제어 또는 다수 증발기 제어를 고려할 경우, 4개 이상의 입·출력을 가지기 때문에 제어기 설계는 더욱 복잡해질 뿐 아니라 시스템의 최적성을 보장하지도 않는다. 반면, 최적 제어의 경우 MIMO 시스템에 적합한 대표적 제어법으로, 특정 평가(비용)함수의 최소화 전략을 통해 시스템의 최적성을 보장하는 제어기를 비교적 쉽게 설계할 수 있다. 즉, 제어 성능과 투입 에너지 간의 절충을 통해 제어 목적에 적합하도록 최적화한다. 뿐만 아니라 상태 공간 모델(state space model)을 이용함으로써 제어 변수 확장에도 유연하게 대응할 수 있다. 이러한 장점으로 인해 기존에 VSRS의 최적 제어기 설계가 제안되었지만^{16,18,19,22,28,29}, VSRS의 해석학적 상태 공간 모델 획득 과정이 너무 복잡하여 비실용적이며, 모델 불확실성과 외란에 대한 제어 강인성이 검토되지 않았다. 또한 최적 제어기 설계 시 핵심 파라미터인 평가함수의 두 하중 행렬의 비율에 다른 제어 성능은 분석되었지만, 제어기 설계 목적을 만족하는 하중 행렬의 확정적이고 체계적인 설계 방법이 제시되지는 않았다. 이렇듯 VSRS의 최적 제어기 설계가 설계자의 경험을 바탕으로 시행착오(trial and error)를 통해 이루어지므로 설계 과정이 불명확하며 번거롭다는 단점이 있었다.

앞서 언급한 제어법들과 달리 지능형 제어에 속하는 퍼지 제어의 경

우, 제어대상의 수학적 모델을 필요로 하지 않기 때문에 수학적으로 모델링이 어려운 VSRS에 매우 유용하다. 그러나 퍼지 제어기 설계의 핵심인 규칙 베이스(rule base)와 소속 함수(membership function)가 전문가의 경험과 지식에 의존하여 설계되기 때문에 이 또한 체계적으로 제어기를 설계하는 것은 매우 어렵다.

VSRS는 모든 구성 요소가 다양한 관과 밸브에 연결되어 있어 시간 지연과 같은 강한 비선형성을 가지며, 외부 열 환경에 노출되어 있으므로 열부하도 불규칙적으로 변동한다. 따라서 VSRS의 해석학적 모델(고차의 상태방정식 모델)을 구하더라도 실제 제어에 적합하도록 만들기 위해서는 모델의 선형화 및 저차원화 과정이 필수적이다. 이 과정에서 발생하는 모델 불확실성, 잡음을 포함한 외란, 상태변수 추정을 위한 관측기의 구현과 그 타당성 검증 등 제어 측면에서는 매우 어려운 일이다. 이러한 특징으로 인해 시스템의 실용적인 선형 공칭 모델을 얻어 시스템을 제어 목적에 맞게 정확하게 제어하기란 쉽지 않다. 따라서 가능한 한 실용적이고 단순한 모델에 기초하면서도 모델 불확실성 및 외란에 강인하며, VSRS의 특성 및 제어 목적에 적합한 제어법을 고려할 필요가 있다.

따라서 본 논문에서는 보다 실용적이고 단순한 모델을 기반으로 VSRS의 MIMO 특성과 및 최적성을 고려한 강인한 최적 강인 서보 제어기 설계를 제안한다. 제안한 방식은 기존의 VSRS 최적 제어기 설계 문제를 해결한다. 첫째, 상태 공간 모델은 동작점에서 동특성 실험을 통해 도출된 기존의 실용적 VSRS 전달함수에서 쉽게 유도한다. 이 경우, 모델 불확실성에 영향을 미치는 파라미터 수가 더 적으므로 모델링이 해석학적 모델에 비해 용이하다. 둘째, 온도 제어 목적을 고려하여 스텝상의 목표값을 엄격하게 따르도록 최적 제어기는 서보형으로 설계하며, 핵심 설계 파라미터인 평가함수의 하중 행렬은 광대역 최적화 기법 중 하나인 유전 알고리즘(Genetic Algorithm; GA)을 이용하여 확정적으로 결정하도록 한

다. 마지막으로, 모델 불확실성 및 열부하 등의 외란에도 강인한 온도 제어 성능을 확보하기 위해 간단한 형태의 Q-필터를 갖는 외란 관측기 (Disturbance Observer; DOB)를 추가한다. DOB의 경우 VSRS를 대상으로 PI 제어기에 제안된 바 있으나 PI 피드백 제어 기반이므로 MIMO 시스템으로 확장하는 것이 번거로우며, Q-필터가 H_{∞} 놈(norm) 최적화를 기반으로 설계된 관계로 매우 복잡하다¹⁵⁾. 따라서 본 논문에서는 DOB의 Q-필터를 간단한 저역 통과 필터(low pass filter) 형태로 설계함으로써 실용성을 높인다.

최종적으로, 제안된 제어기는 VSRS 기반의 오일쿨러 시스템(Oil Cooler System; OCS)을 제어대상으로 설계되며, MATLAB/Simulink 기반 시뮬레이션 및 실험을 통해 제어 성능과 타당성을 검증하도록 한다. 또한 DOB가 있는 경우와 없는 경우로 나누어 제어 결과를 상세히 비교함으로써 모델 불확실성 및 외란에 대한 강인성을 평가하여 DOB의 효용성을 입증한다.

1.2 연구 범위 및 내용

본 논문에서는 가변속 냉동시스템의 강인한 온도 제어를 위해 최적 서보 제어기와 DOB를 설계하고 MATLAB/Simulink 기반 시뮬레이션 및 실험을 통해 타당성과 강인성을 검증하고자 한다. 먼저, 제어기 설계에 사용하는 제어대상 모델의 경우, 선행 연구에서 OCS의 동작점 근방에서 동특성 실험을 통해 모델링된 단순 1차계 전달함수 모델을 변환함으로써 제어대상의 상태 공간 모델을 확보한다⁶⁾.

최적 서보 제어기는 온도 제어 시의 엄밀한 지령값 추종을 위해 Smith-Davison의 방법을 이용하여 서보계로 구성한다³⁰⁾. 이 과정에서 핵심 설계 파라미터인 평가함수의 두 하중 행렬 중 한 개를 고정함으로써 나머지 한 개만을 선정하는 간단한 설계 문제로 귀착된다. 따라서 하중 행렬을 시행착오 없이 체계적으로 설계하기 위해 광대역 최적화 기법 중 하나인 GA를 이용한다. GA의 목적함수는 보편적으로 활용되는 ITAE(Integral Time Absolute Error)를 사용하며, 제어기 설계 사양을 GA의 제약 조건에 반영함으로써 목적에 적합한 하중 행렬을 확정적으로 선정하도록 한다. 이렇게 설계된 제어기는 시뮬레이션과 OCS의 실험 결과를 비교함으로써 타당성이 검증된다.

또한 모델 불확실성과 외란에 대한 온도 제어 강인성을 확보하기 위해 DOB를 추가로 설계한다. DOB 설계의 핵심 파라미터인 Q-필터는 필터의 시정수(time constant)와 상대 차수(relative degree) 2가지 요소를 통해 간단히 설계가 가능한 저역 통과 필터 형태로 구성하여 실용성을 높인다. 마지막으로 DOB를 갖지 않는 최적 서보 제어기와 DOB를 갖는 최적 강인 서보 제어기로 구분하고, DOB 적용 유·무에 따른 제어 성능을 비교하여 제안된 방법의 강인성과 그 유효성을 검증한다.

본 논문은 총 7장으로 구성하였으며, 각 장의 개요는 다음과 같다.

제1장에서는 VSRS의 최적 강인 서보 제어기를 연구하게 된 배경 및 본

논문의 목적과 전반적인 연구 내용을 설명한다.

제2장에서는 VSRS의 기본 구성과 본 연구에서 사용된 OCS 실험 장치와 동특성 실험으로 구해지는 전달함수 모델링에 대해 설명한다.

제3장에서는 변환된 상태 공간 모델을 기반으로 최적 서보 제어 이론을 설명하며, GA를 통해 평가함수의 하중 행렬을 선정함으로써 제어기를 설계한다.

제4장에서는 DOB 이론을 설명하고 DOB의 핵심인 Q-필터를 설계한다.

제5장에서는 MATLAB/Simulink 기반 시뮬레이션을 통해 설계된 제어기의 제어 성능을 확인하고, 하중 행렬 및 Q-필터 등의 설계 파라미터가 제어 성능에 미치는 영향을 분석한다.

제6장에서는 실험 결과를 통해 설계된 제어기의 실제 성능 및 타당성을 검증하고 고찰한다. 또한 DOB의 유·무에 따른 실제 제어 성능을 분석하여 제안된 DOB의 강인성을 입증한다.

제7장에서는 본 연구를 통해 얻은 결과를 종합적으로 분석하고, 최종적으로 결론을 도출한다.

제2장 가변속 냉동시스템의 온도 제어

2.1 가변속 냉동시스템의 구성 및 제어

Fig. 2.1은 상용 오일쿨러를 시뮬레이션하여 실험 장치로 구성한 가변속 냉동시스템(VSRS) 기반 오일쿨러 시스템(Oil Cooler System; OCS)을 나타낸다. VSRS는 기본적으로 가변속 압축기, EEV, 응축기 및 증발기로 구성되며 증기 압축 냉동 사이클(vapor compression cycle)로 이루어진다. 본 논문의 제어대상인 OCS는 VSRS, 열전달 유체(heat transfer fluid), 열부하 장치로 구성된다.

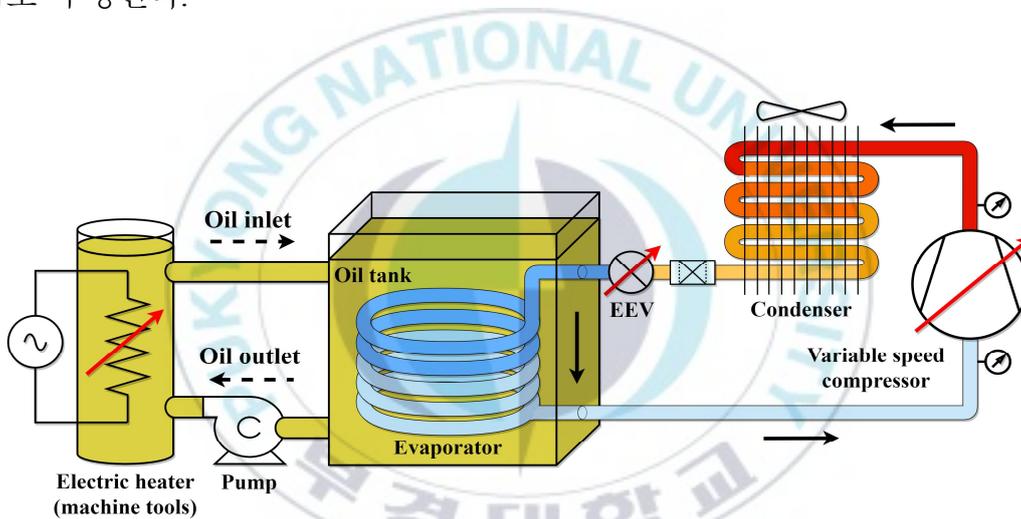


Fig. 2.1 Schematic of oil cooler system.

일반적으로 금속물을 가공하는 공작기계(machine tools) 등에서는 가공시 발생하는 마찰열로 인해 공작물의 온도가 상승하고 이에 따라 공작물의 길이가 변하게 된다. 이는 공작물의 가공 정밀도가 저하됨을 뜻하며 이러한 정밀도 저하를 방지하기 위해 OCS가 고속, 고정밀 공작기계에 이용된다. Fig. 2.1의 OCS에서는 증발기가 오일탱크 내부에 담겨 있고, 증발기 냉매의 열 흡수로 인해 탱크 내의 오일(열전달 유체)이 냉각된다. 냉각된 오일은 펌프를 통해 공작기계의 공작 부위(전기히터)로 공급됨으로써

열부하를 제거한다. OCS 실험 장치에서는 공작기계의 열부하를 전기히터가 대신한다.

OCS는 가변속 드라이브인 인버터(inverter)로 압축기의 회전 속도를 조절하여 냉동기의 냉각 용량을 조절함으로써 오일을 냉각하고 이를 통해 오일출구온도를 목표 온도로 유지한다. 이 과정에서 압축기의 회전 속도가 급격하게 변하면 냉매 질량 유량 및 증발 압력 또한 급격하게 변동하게 되므로 액백(liquid back) 현상이 발생하거나 압축기에서의 과열 증기 압축에 따른 COP가 저하할 수 있다. 따라서 이러한 부작용을 방지하기 위해 EEV 드라이브를 통해 EEV의 개방각도(opening angle 이하 개도)를 조절하여 과열도도 동시에 제어한다.

기본적으로 압력·온도·유량 등의 물리량을 제어하는 전달함수 기반 프로세스 제어계는 Fig. 2.2와 같이 제어대상의 전달함수 $G(s)$ 와 제어기의 전달함수 $C(s)$ 를 가지는 전형적인 음의 피드백 제어계로 나타난다. 따라서 온도를 제어하는 가변속 냉동시스템의 제어계도 이에 속한다. 제어계의 입력과 출력이 각각 한 개일 경우 이를 SISO(Single-Input Single-Output) 시스템이라고 하며, 전달함수를 기본 모델로 제어기 $C(s)$ 에는 주로 PID 제어기가 적용된다.

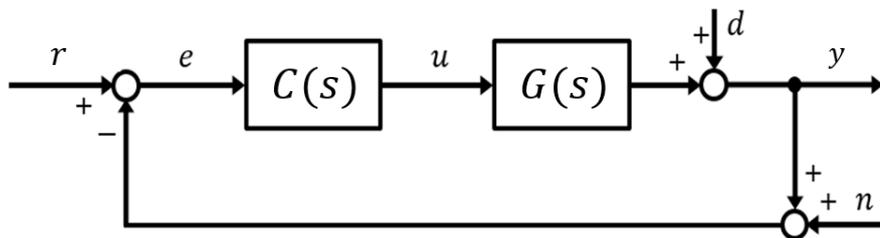


Fig. 2.2 Block diagram of typical feedback control system with disturbance and noise.

가변속 냉동시스템은 목표로 하는 제어량이 열전달 유체의 온도와 냉매 과열도이며, 조작량(제어입력)이 압축기 인버터 주파수와 EEV 개도이므로

입력과 출력이 각각 2개인 다변수시스템이다. 이때, 전달함수 모델은 2개의 입·출력 변수를 동시에 표현할 수 없으므로 Fig. 2.3과 같이 2개의 피드백 제어계를 갖는 Dual-SISO system으로 나타낼 수 있다. 다만, 이 경우, 두 제어계는 각기 독립적인 관계로 간주하므로 제어 변수들 간의 상호간섭 영향은 무시되거나 이들 영향을 제거하기 위해 비간섭 제어계로 설계된다¹⁰⁾.

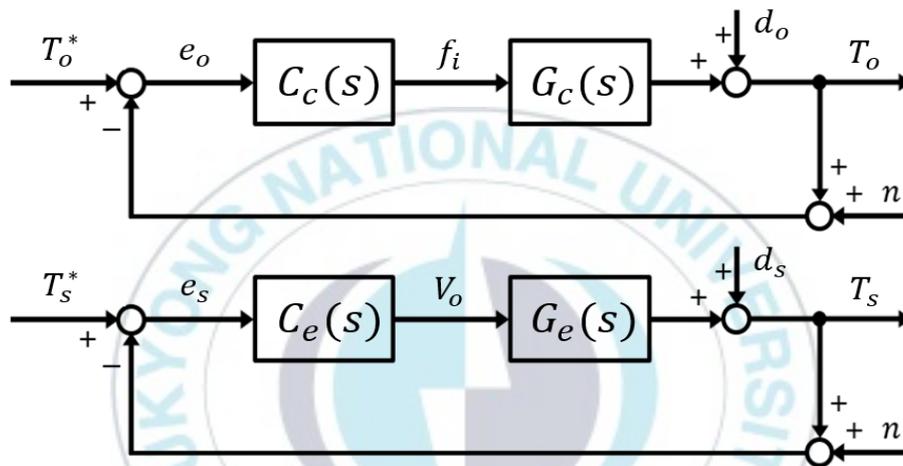


Fig. 2.3 Block diagram of dual-SISO feedback control system for VSRS.

다수의 변수로 표현되는 MIMO(Multi-Input Multi-Output) 시스템은 Fig. 2.4와 같이 상태 공간 모델을 이용하여 나타낼 수 있다.

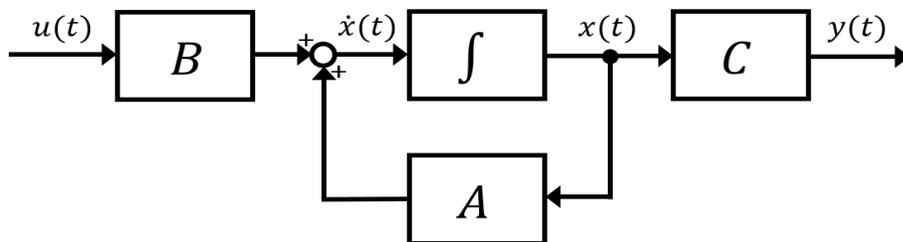


Fig. 2.4 Block diagram of state space model for MIMO system.

2.2 실험 장치의 구성 및 사양

Fig. 2.5는 실험을 위한 OCS와 데이터 수집 및 실시간 제어 장치의 개략도를 나타낸다. 가변속 압축기는 3상 농형(squirrel cage type) 유도 전동기에 의해 구동되는 로터리(rotary)식 압축기로 인버터 주파수 변화를 통해 회전수가 제어된다. 압축기의 회전수 제어를 위한 인버터는 범용 ‘V/f=일정’ 타입이 사용된다. EEV의 경우에는 EEV 드라이브를 이용하여 EEV 내부 스텝모터의 각도를 조절하여 개도를 제어한다. 그 외에 공랭식 핀-튜브 응축기, 최대 냉각 능력이 2.1 kW인 나관 코일 증발기 등으로 구성되었다. 증발기는 오일 냉각을 위해 오일탱크에 담겨 있으며, 전기히터가 동작기계에서 발생하는 열부하를 대신하도록 하였다. Fig. 2.6은 실제 실험 장치의 사진을 나타내며, 주요 장치의 사양은 Table 2.1과 같다.

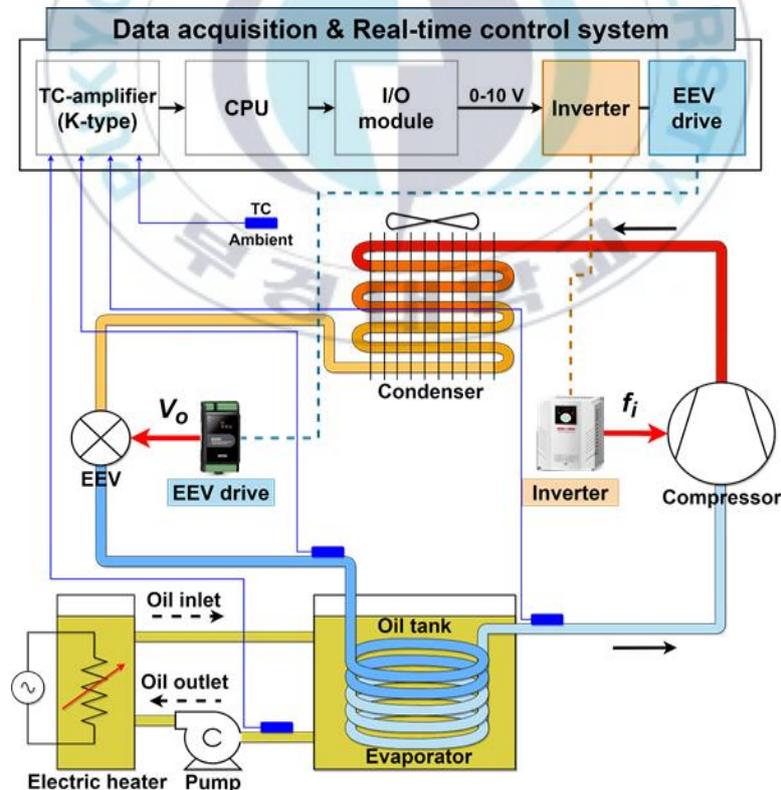


Fig. 2.5 Experimental system for OCS.

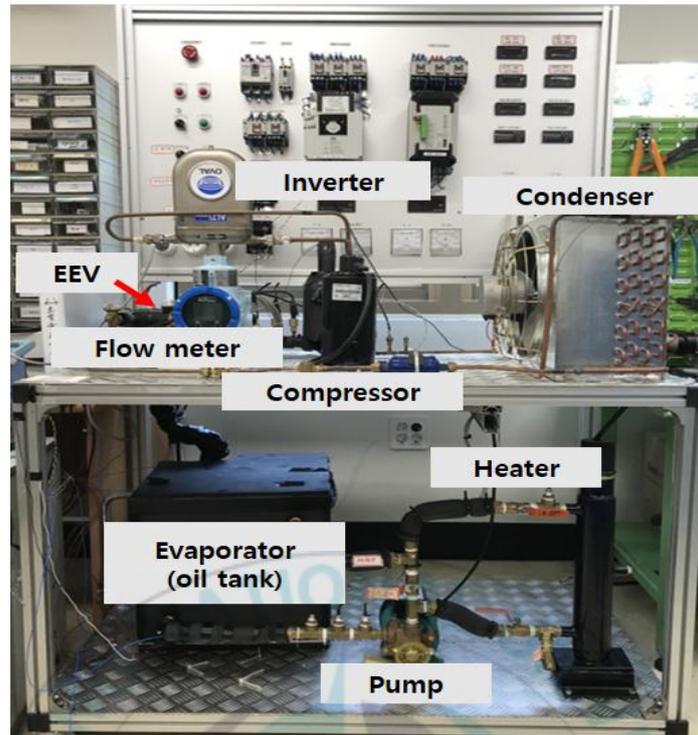


Fig. 2.6 Real experimental unit.

Table 2.1 Specifications of test unit.

Component	Note
Compressor	Rotary type, 30-90 [Hz], 0.86 [kW]
EEV	0-100 [%]; 0-2,000 [step], 12 [V]
Condenser	Air-cooled fin and tube-type, 5.24 [kW]
Evaporator	Bare tube coil-type, immersion type, 2.1 [kW] (max.)
Refrigerant	R-22, 0.9 [kg] (max.)
Inverter	4.5 [kVA], 3 phase, PWM, V/f = constant type
EEV drive	4 [W], 24 [V], bipolar type
Electric heater	4.5 [kW] (max.)
Oil tank	400 [mm] × 400 [mm] × 385 [mm]
Oil	ISO VG 10, Velocite oil, no. 6, 40 [L]

제어 장치에서 제어입력 연산을 위한 온도 정보는 K-type 열전대를 통해 측정되고, DAQ 시스템을 거쳐 CPU에 전달된다. CPU에서는 MATLAB에서 설계된 제어 로직에 따라 제어입력을 연산하고, 계산된 조작량을 PXIe

장치를 통해 인버터 주파수와 EEV 개도를 실시간 제어할 수 있도록 I/O 모듈을 통해 아날로그 전압(0~10 V) 지령으로 출력한다.

2.3 동특성 실험을 통한 전달함수 모델링

가변속 냉동시스템의 제어기 설계를 위해 제어량인 오일출구온도 T_o 와 과열도 T_s 의 지령값 선정이 선행된다. 두 개의 제어량 중 엄밀한 온도 제어를 필요로 하는 OCS의 특성상 오일출구온도를 주 제어량으로 하고 지령(설정)값은 공작기계용 냉각기의 특성을 고려하여 25°C로 선정한다. 과열도는 압축기의 급격한 가변속 제어로 야기될 수 있는 액압축 방지와 최대 COP를 유지하기 위해 부가적으로 제어하는 보조 제어량으로 둔다. 과열도의 지령(설정)값은 이 시스템에 대한 선행 연구자의 과열도 실험 데이터인 Fig. 2.7을 참고한다¹⁵⁾. 이에 따르면, 과열도는 8°C 이상 구간에서는 COP가 감소한다. 따라서 과열도의 설정값은 이 오일쿨러 시스템의 액압축을 방지하면서 COP의 감소를 피할 수 있는 8°C 미만의 값인 7°C로 결정하였다¹⁵⁾.

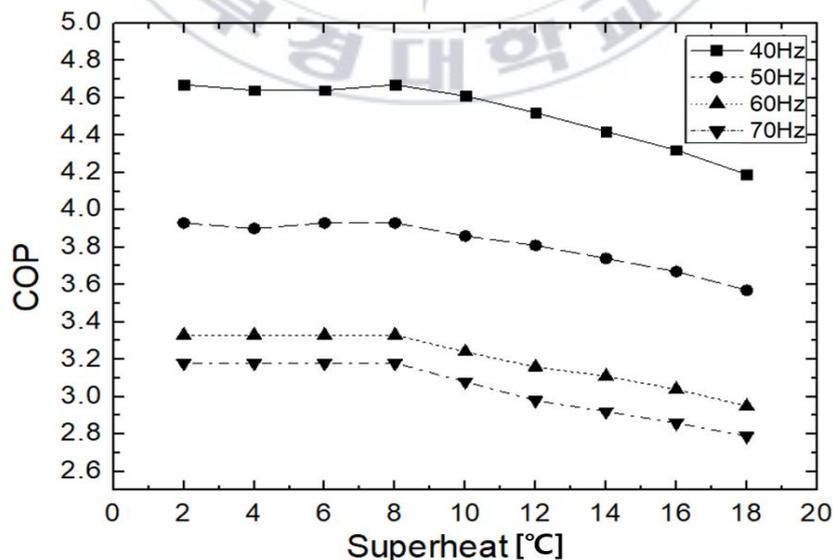


Fig. 2.7 COP profile according to superheat.

Fig. 2.8은 OCS의 입·출력 간의 전달함수 관계를 나타낸다. $G_c(s)$ 는 가변속 압축기에서 입력인 인버터 주파수 f_i 에 따른 출력인 오일출구온도 T_o 의 관계를 나타낸다. $G_e(s)$ 는 EEV에서 입력인 EEV 개도 V_o 에 따른 출력인 과열도 T_s 의 관계를 나타낸다. 또한 내부의 $G_{i1}(s)$ 과 $G_{i2}(s)$ 는 입력이 타 출력에 미치는 간접 영향을 나타내며, $G_d(s)$ 는 열부하 등의 외란이 주 제어량인 오일출구온도 T_o 에 미치는 영향을 나타낸다. $G_{i1}(s)$ 와 $G_d(s)$ 는 OCS 제어계의 동특성을 엄밀하게 시뮬레이션하기 위해 이용하였지만, 제어기 설계 시에는 고려하지 않았다. 더욱이 $G_{i2}(s)$ 는 그 영향이 무시할 수 있을 정도로 미미하므로 시뮬레이션 모델에서 제외되었다.

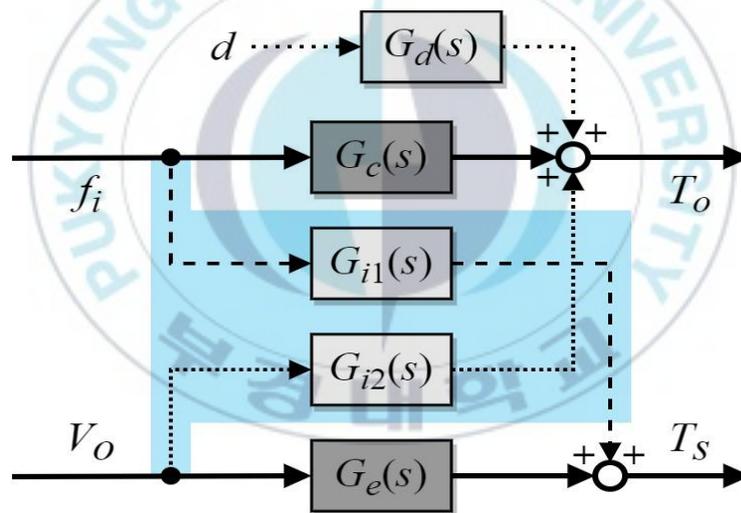


Fig. 2.8 Transfer functions for compressor and EEV.

Fig. 2.8의 각 전달함수는 동작점 근방에서 조작량(제어입력)의 미소 변동 실험을 통해 얻은 제어량의 동특성을 분석해 구해진다⁶⁾. Fig. 2.9는 동특성 실험 데이터로부터 1차계 전달함수를 모델링하는 과정을 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 제어량을 목표 온도(동작점)에 수렴시킨 후 조작량을 스텝으로 변화시킨다. 이때, Fig. 2.8에서 보듯이 제어량 T_o 와

T_s 는 모두 조작량인 f_i 와 V_o 의 함수이므로 한 제어량을 변동시킬 경우, 다른 한쪽의 제어량은 동작점에 고정시켰다. 실험에서 획득한 응답 그래프에서 제어량이 최종값의 63.2%에 도달하는 시간을 시정수 τ 로, 제어량의 변화량을 조작량의 변화량으로 나눈 값($\Delta T/\Delta u$)을 DC gain인 k 로 둔다. 또한 조작량 변동으로부터 제어량 변동이 나타나기까지의 시간인 부동작 시간(dead time) \tilde{d} 를 선정한다. 이렇게 얻은 특성 파라미터로 식(2.1)의 비선형 1차 전달함수를 구성할 수 있다.

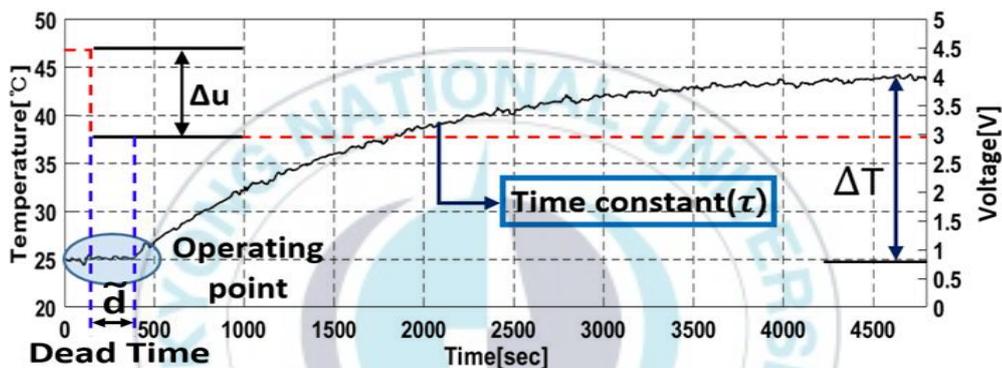


Fig. 2.9 Transfer function model by experiment at near operating point.

$$G(s) = \frac{k}{\tau s + 1} e^{-\tilde{d}s} \quad (2.1)$$

본 논문에서는 선행 연구자에 의해 구해진 동특성 전달함수 모델을 이용한다. Fig. 2.10은 Fig. 2.5를 대상으로 진행된 동특성 실험 결과로, (a)는 인버터 주파수 변경에 따른 오일출구온도의 응답을, (b)는 EEV 개도 변경에 따른 과열도의 응답을 나타낸다. 실험에서 오일출구온도와 과열도의 동작점은 각각 25°C, 7°C이며, 주변 온도는 27°C, 열부하는 1.68 kW이다. 또한 인버터 주파수는 55 Hz에서 45 Hz로, EEV 개도는 900 step에서 700 step으로 감소되었다⁶⁾. 자세한 실험 조건은 Table 2.2, 2.3과 같다.

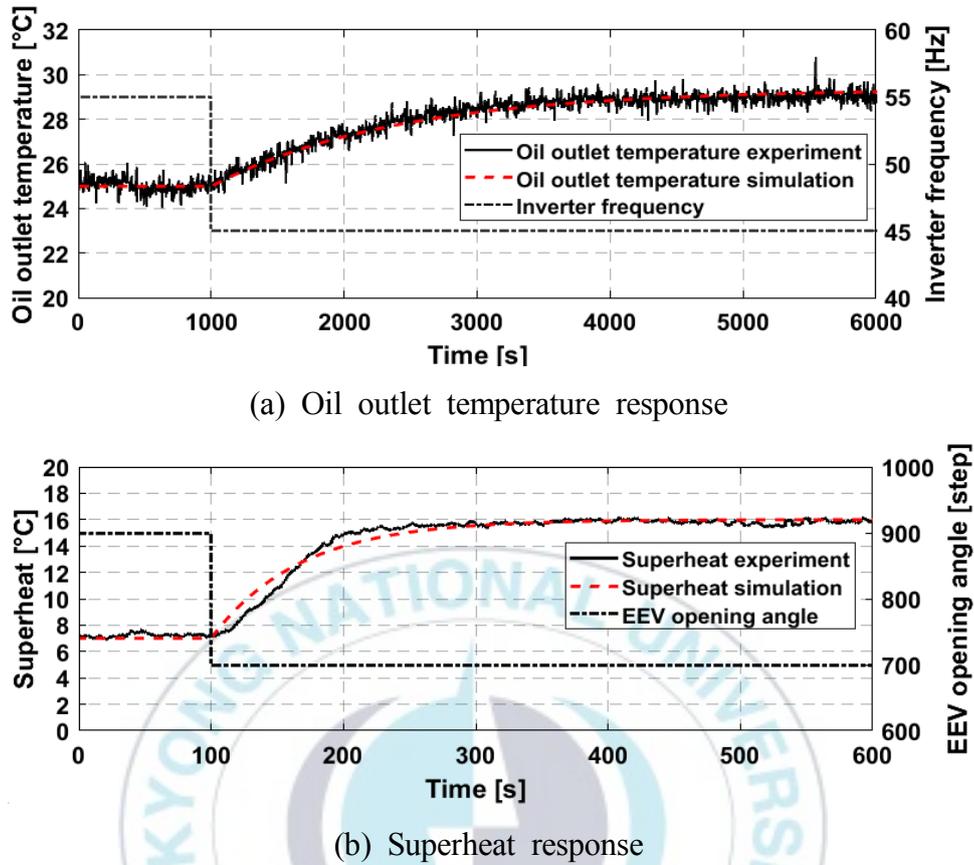


Fig. 2.10 Experimental results for obtaining transfer function model.

Table 2.2 Experimental data of dynamic characteristic for $G_c(s)$.

T_o [°C]	f_i [Hz]	Load [kW]	V_o [step]	T_a [°C]	\dot{m} [kg/h]	P_h [bar]	P_l [bar]
25→29.3	55→45	1.68	900	26.7	42	12.8	4.8

Table 2.3 Experimental data of dynamic characteristic for $G_e(s)$.

T_s [°C]	V_o [step]	Load [kW]	f_i [Hz]	T_a [°C]	\dot{m} [kg/h]	P_h [bar]	P_l [bar]
7→16	900→700	1.68	55	27	42.9	13	4

Fig. 2.10의 응답을 통해 식(2.1)의 전달함수를 구성하는 특성 파라미터는 Table 2.4와 같이 구해진다.

Table 2.4 Characteristic parameters obtained from experimental results.

	Time constant τ [s]	DC gain k	Dead time \tilde{d} [s]
Compressor	1680	-0.43	51
EEV	67	-0.045	5

여기서 \tilde{d} 가 τ 에 비해 무시해도 될 정도로 짧으면 이는 식(2.2)와 식(2.3)의 간단한 선형 1차 시스템으로 나타낼 수 있다. Fig. 2.10에서 검은색 실선은 실험 결과를 나타내고, 빨간색 파선은 1차계로 모델링된 전달함수 식(2.2), 식(2.3)의 시뮬레이션 응답을 나타낸다. 두 응답이 매우 유사하므로 1차계 선형 근사화 모델의 타당성을 확인할 수 있다.

$$G_c(s) = \frac{-0.43}{1680s + 1} \quad (2.2)$$

$$G_e(s) = \frac{-0.045}{67s + 1} \quad (2.3)$$

이러한 실험적 전달함수 모델링 방법은 열교환기에 대한 고차의 해석적 상태 공간 모델이 요구되지 않으므로 제어기 설계에는 매우 실용적이다. 하지만 이들 전달함수 모델은 특정 실험 환경에서 모델링되고, 비선형 항인 부동작 시간을 무시하여 단순 1차계로 선형화되었으므로 모델 불확실성을 불가피하게 포함한다.

제3장 최적 서보 제어기 설계 및 파라미터 최적화

3.1 상태 공간 모델링

최적 제어기 설계는 상태 공간 모델 기반이므로 식(2.2), 식(2.3)의 전달 함수 모델을 역 라플라스 변환을 통해 식(3.1)의 상태 공간 모델로 변환한다. 상태 공간 모델은 상태방정식과 출력방정식으로 구성되며, 계수 행렬 $A(2 \times 2)$, $B(2 \times 2)$, $C(2 \times 2)$, 상태변수 $x(t)(2 \times 1)$, 제어입력 $u(t)(2 \times 1)$, 출력변수 $y(t)(2 \times 1)$ 를 가지는 상태 공간 모델 식(3.2)로 변환된다. 이때, 각 변수들은 $x(t) = [T_o \ T_s]^T$, $u(t) = [f_i \ V_o]^T$, $y(t) = [T_o \ T_s]^T$ 의 값을 나타내게 된다. 여기서, $d(t) = d$ 인 스텝상 외란을 나타내며 상첨자 T 는 행렬의 전치(transpose)를 뜻한다. 상세한 변환 과정은 Appendix(A.1)에 나타내었다.

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + d(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (3.1)$$

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.0006 & 0 \\ 0 & -0.0149 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.000256 & 0 \\ 0 & -0.000672 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (3.2)$$

3.2 최적 서보 제어 이론

최적 제어법은 식(3.1)의 (A, B) 가 가제어(controllable)인 다입·출력 시스템에 대하여 식(3.3)과 같은 2차 형식의 평가(비용)함수 J 를 최소로 하는 최적의 제어입력 $u(t)$ 를 설계한다. 식(3.1)의 시스템에서 $x(t)(n \times 1)$ 와 $u(t)(m \times 1)$ 는 각각 상태변수와 제어입력을 나타내고 $y(t)(l \times 1)$ 와 $d(t)(n \times 1)$ 는 각각 출력변수와 스텝상 외란을 나타낸다.

$$J = \int_0^{\infty} [x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t)]dt \quad (3.3)$$

식(3.3)의 평가함수 J 에서 $Q(n \times n)$ 는 상태변수에 대한 하중 행렬로 양의 반한정($Q \geq 0$) 대칭행렬이며, $R(m \times m)$ 은 제어입력에 대한 하중 행렬로 양의 한정($R > 0$) 대칭행렬이다. 평가함수의 우변 첫째 항에서는 Q 를 조절하여 상태변수 $x(t)$ 가 빠른 제어 응답을 보이도록 즉, 속응성에 가중치를 부여하며, 둘째 항에서는 R 을 조절하여 제어입력 $u(t)$ 에 대하여 소비에너지에 가중치를 부여한다. 즉, Q 의 증대는 속응성을 증가시키고, R 의 증대는 제어입력을 감소시킨다. 속응성이 클수록, 소비에너지가 적을수록 J 의 값은 작아진다. 최적 제어법은 J 를 최소화하는 제어입력 $u(t)$ 를 구하는 제어법이다. 따라서 J 를 최소화한다는 것은 시스템의 속응성을 좋게 하면서도 소비에너지를 적게 함을 뜻한다. 하지만 속응성을 좋게 하면 소비에너지는 커지고, 소비에너지를 적게 하면 속응성이 나빠진다. 따라서 속응성 향상과 소비에너지 감소 이 두 가지 요구를 동시에 만족시킬 수는 없기 때문에 하중 행렬 Q 와 R 을 적절한 비율로 조절하는 절충이 요구된다.

최적 제어법은 평가지표인 평가함수 J 를 최소화하는 최적의 상태 피드백 제어입력 $u(t)$ 를 구하는 것이 목적이며 이는 식(3.4)로 정의된다. 특히 $u(t)$ 를 구성하는 제어 게인 K 를 구하는 것이 이 제어기 설계법의 최종 목적이라고 볼 수 있다. K 는 상태 피드백 게인 행렬을 나타내며 식(3.5)와 같이 구해진다. 여기서 $P(n \times n)$ 는 임의의 대칭행렬로 식(3.6)의 대수 리카티 방정식(algebraic Riccati equation)의 유일한 해인 양의 정부호 행렬이다.

$$u(t) = -Kx(t) \quad (3.4)$$

$$K = R^{-1}B^T P \quad (3.5)$$

$$A^T P + PA + Q - PBR^{-1}B^T P = 0 \quad (3.6)$$

Fig. 3.1은 최적 제어법에 의해 구성되는 상태 피드백 제어 시스템의 블록선도를 나타낸다.

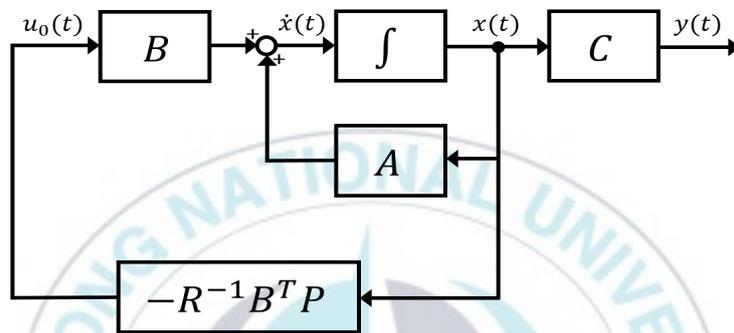


Fig. 3.1 Block diagram of state feedback control system.

제어계가 목표 입력(지령값)에 대하여 정상상태오차(정상편차) 없이 추종하기 위해서는 제어계의 개루프 전달함수에 목표 입력의 발생 모델이 내포되어야 한다는 내부 모델의 원리가 잘 알려져 있다. 본 제어계에서 목표로 하는 스텝상 목표 입력에 대해 정상 편차 없이 추종하는 서보 제어를 위해서는 모델의 개루프 전달함수가 $1/s$ 을 내포해야 한다. 제어대상이 $1/s$ 을 내포하지 않는 경우에는 제어기가 이를 내포하도록 설계되어야 한다. 따라서, 최적 서보 제어계는 다음의 3가지 조건을 만족하도록 설계된다. 첫 번째로 서보계가 점근 안정할 것, 두 번째로 스텝상 외란 $d(t)=d$ 가 존재할 때에도 출력 $y(t)$ 가 목표 입력 $r(t)=r$ 에 정상상태오차 없이 추종할 것, 세 번째로 계수 행렬 A, B 의 미소 변동에 대해서도 두 번째 조건이 만족되어야 한다.

출력 $y(t)$ 를 목표값 r 로 추종시키는 서보계에서는 $t \rightarrow \infty$ 에서 $y(t) = r$ 을

만족하더라도 $u(t) \neq 0$ 이므로 식(3.3)에서 평가함수 J 의 우변 둘째 항이 발산하고, 상태변수 $x(t)$ 또한 0이 아니므로 J 의 우변 첫째 항도 발산하여 J 가 무한대로 발산하게 된다. 따라서 이러한 평가함수로는 J 를 최소화하는 최적의 제어입력을 구할 수 없다. 따라서 이러한 평가함수의 발산 문제를 해결하여 서보 제어에 적합한 최적 서보 제어기 설계는 Smith-Davison과 Takeda-Kitamori의 방법이 알려져 있다^{30,31}. 본 논문에서는 이 가운데 이해와 적용이 용이한 Smith-Davison의 방법으로 최적 서보 제어기를 설계한다.

식(3.1)에서 $t \rightarrow \infty$ 에서는 상태변수가 정상상태에 도달하므로 식(3.4)의 제어입력 $u(t)$ 는 일정값을 가지게 되어 $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{u}(t) = 0$ 이 됨을 알 수 있다. 따라서 식(3.1)을 미분하면 식(3.7)이 되고, 새로운 제어입력으로서 $u_a(t) = \dot{u}(t)$ 를 도입하여 식(3.7)에 대입하여 이를 행렬 표현으로 정리해 확대계 형태로 나타내면 식(3.8)이 된다. 이때 확대계에서는 시스템과 변수를 확대 이전의 시스템 및 변수와 구분하기 위해 확대계(augmented system)를 뜻하는 하첨자 a 를 이용한다. 또한 출력 $y(t)$ 는 새롭게 식(3.9)로 표현할 수 있다. 이 과정에서 스텝상 외란 d 는 $\dot{d} = 0$ 이므로 외란 항이 소거된다.

$$\begin{cases} \ddot{x}(t) = A\dot{x}(t) + B\dot{u}(t) \\ \dot{y}(t) = C\dot{x}(t) \end{cases} \quad (3.7)$$

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}(t) \\ \dot{y}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ y(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} \dot{u}(t) \quad (3.8)$$

$$y(t) = [0 \ I] \begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ y(t) \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

여기서 제어계가 서보계임을 고려하여 제어 오차 $e(t)$ 를 $e(t) = y(t) - r$ 로 정의하고 양변을 미분하면 $\dot{e}(t) = \dot{y}(t)$ 가 됨을 알 수 있다. 이를 식(3.8)과 (3.9)에 대입하여 정리하면 식(3.10)과 식(3.11)이 도출된다.

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}(t) \\ \dot{e}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ e(t) + r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} \dot{u}(t) = \begin{bmatrix} A & 0 \\ C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ e(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} \dot{u}(t) \quad (3.10)$$

$$y(t) = [0 \ I] \begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ e(t) + r \end{bmatrix} = [0 \ I] \begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ e(t) \end{bmatrix} + r \quad (3.11)$$

새로운 상태변수 $x_a(t) = [\dot{x}(t)^T \ y(t)^T]^T$ 를 정의하고, 앞서 새롭게 정의한 제어입력 $u_a(t) = \dot{u}(t)$ 를 이용하여 식(3.10)과 식(3.11)을 정리하면 확대계 상태 공간 모델 식(3.12)가 얻어진다. 여기서 확대계 계수 행렬은 $A_a = \begin{bmatrix} A & 0 \\ C & 0 \end{bmatrix}$, $B_a = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}$, $C_a = [0 \ I]$ 이 된다. 이 시스템이 제어가 되기 위해서는 (A, B) 는 가제어라야 하며, $\text{rank} \begin{bmatrix} A & B \\ C & 0 \end{bmatrix} = n + m$ 을 만족하여야 한다³⁰⁾.

$$\begin{cases} \dot{x}_a(t) = A_a x_a(t) + B_a u_a(t) \\ y(t) - r = C_a x_a(t) \end{cases} \quad (3.12)$$

이렇게 구한 식(3.12)의 확대계 계수 행렬 및 변수와 확대계 하중 행렬 Q_a, R_a 를 이용하여 식(3.3)의 평가함수 J 를 재구성하면 식(3.13)의 확대계 평가함수 J_a 가 얻어진다.

$$J_a = \int_0^{\infty} [x_a^T(t) Q_a x_a(t) + u_a^T(t) R_a u_a(t)] dt \quad (3.13)$$

여기서 확대계 상태변수 $x_a(t)$ 와 제어입력 $u_a(t)$ 의 $t \rightarrow \infty$ 에서 값은 $\lim_{t \rightarrow \infty} x_a(t) = 0$ 이며, 또한 $\lim_{t \rightarrow \infty} u_a(t) = 0$ 이므로 확대계 평가함수 J_a 는 발산하지 않는다. 따라서 평가함수 최소화 전략을 사용할 수 있게 된다.

식(3.12)에서 $x_a(t) \rightarrow 0$ 으로 하는 제어를 행하면 $y(t) = r$ 이 달성됨을 알 수 있으며, 이 제어는 식(3.13)의 평가함수 J_a 를 최소화함으로써 실현할 수 있다. 여기서 식(3.12)의 출력방정식을 정리하여 $x_a(t)$ 에 대한 식으로 나타내면 식(3.14)와 같다. 따라서 식(3.14)를 평가함수 J_a 에 대입하고 확대계 하중 행렬을 $Q_a = C_a^T C_a$ 로 가정하면 J_a 의 우변 첫째 항은 식(3.15)와 같이 정리된다.

$$x_a(t) = C_a^{-1}\{y(t) - r\} \quad (3.14)$$

$$\begin{aligned} x_a^T(t) Q_a x_a(t) &= [C_a^{-1}\{y(t) - r\}]^T (C_a^T C_a) C_a^{-1}\{y(t) - r\} \\ &= \{y(t) - r\}^T (C_a^{-1})^T (C_a^T C_a) C_a^{-1}\{y(t) - r\} \\ &= \|y(t) - r\|^2 \end{aligned} \quad (3.15)$$

이에 따라 평가함수 J_a 는 식(3.16)으로 정리되며, 평가함수 J_a 는 하중 행렬 R_a 만을 미지의 파라미터로 가지게 된다.

$$J_a = \int_0^{\infty} [\|y(t) - r\|^2 + u_a^T(t) R_a u_a(t)] dt \quad (3.16)$$

식(3.16)을 최소화하는 최적 제어입력은 $u_a(t) = -K_a x_a(t)$ 가 되며, $K_a = [K_1 \ K_2]$ 이고 $u_a(t)$ 는 식(3.17)로, K_a 는 식(3.18)로 나타난다. 이 제어계에서 유일한 미지의 파라미터인 하중 행렬 R_a 를 설계자가 결정하면 식

(3.19)의 확대계 대수 리카티 방정식의 해 P_a 를 통해 상태 피드백 게인 행렬 K_a 가 한 가지로 결정된다.

$$u_a(t) = -K_1 \dot{x}(t) - K_2 e(t) \quad (3.17)$$

$$K_a = R_a^{-1} B_a^T P_a \quad (3.18)$$

$$A_a^T P_a + P_a A_a + Q_a - P_a B_a R_a^{-1} B_a^T P_a = 0 \quad (3.19)$$

여기서 $u_a(t) = \dot{u}(t)$ 이므로 본래의 실제 제어입력 $u(t)$ 는 $u_a(t)$ 를 적분함으로써 식(3.20)과 같이 구해진다. 이는 상태변수 $x(t)$ 의 피드백과 제어오차 $e(t)$ 적분의 합으로 표현된다. 초기값 $x(0) = 0$ 라면, 최적 서보 제어기는 최종적으로 Fig. 3.2와 같이 구성된다. 여기서 게인 K_1 , K_2 는 각각 상태 피드백 게인과 서보(servo) 게인이다.

$$u(t) = -K_1 x(t) - K_2 \int_0^{t_f} e(t) dt + K_1 x(0) \quad (3.20)$$

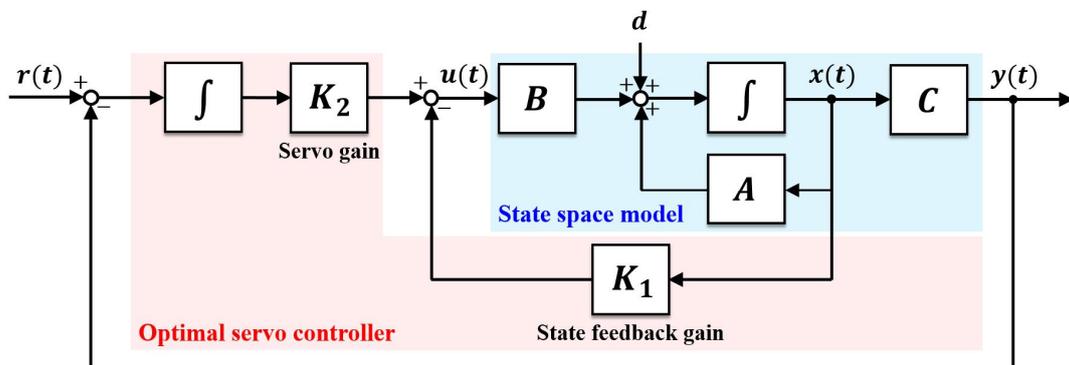


Fig. 3.2 Block diagram of optimal servo control system.

3.3 유전 알고리즘에 의한 최적화 문제 정의

3.2절의 최적 서보 제어 이론을 통해 스텝상의 목표 입력에 엄밀히 추종하는 최적 서보 제어기는 설계자가 미지의 파라미터인 하중 행렬 R_a 를 결정한 후, 식(3.18)과 (3.19)통해 최적 제어입력 $u(t)$ 가 결정된다. 따라서 최적 서보 제어기의 설계는 결국 하중 행렬 R_a 의 결정 문제로 귀착되므로 제어기 설계가 매우 간단해진다. 이 하중 행렬 R_a 는 설계자의 경험에 근거한 반복적 수행 즉, 시행착오를 통해 결정되어 왔다. 제어 시스템에 따라서 시행착오 과정이 짧을 수도, 길 수도 있으며, 이렇게 선정된 하중 행렬이 과연 최적인지 의문을 가질 수도 있다. 따라서 이러한 시행착오 과정을 줄이고 적절한 기준, 선정 방법 등을 마련하여 하중 행렬을 최적화할 필요가 있다.

최적 제어 이론에 의하면 제어입력 $u(t)$ 가 $m \times 1$ 행렬로 나타남에 의해 $R_a = [r_{ij}]_{m \times m}$ 에 대하여 R_a 는 식(3.21)과 같은 $m \times m$ 의 양의 정부호 대칭 행렬로 나타난다. 이 R_a 를 결정한다는 것은 대칭행렬의 모든 요소들을 결정한다는 것이며, 제어 변수가 많을수록 선정해야 할 요소들이 많아지므로 R_a 를 적절히 결정하기란 쉽지 않다.

$$R_a(m \times m) = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & \cdots & r_{mm} \end{bmatrix} (r_{ij} = r_{ji}) \quad (3.21)$$

따라서, 제어기 설계 사양을 제어기 설계의 기준으로 삼아 이를 만족하는 하중 행렬 R_a 를 기존의 시행착오 방법이 아닌 광대역 최적해 탐색 알고리즘인 유전 알고리즘을 적용하여 구하고자 한다.

3.3.1 유전 알고리즘의 개요

유전 알고리즘(Genetic Algorithm; GA)은 확률론적 최적화 기법에 기반을 둔 대표적인 알고리즘의 하나로 1975년에 존 홀랜드(John Holland)에 의해 개발된 전역 최적화 기법이다³²⁾. GA는 주어진 환경 조건에서 유리한 유전인자를 가진 개체가 그렇지 않은 개체보다 생존률, 생식률이 높아짐을 뜻하는 자연선택과 유전자 개념을 이용한다. 문제에 대한 해(solution)를 각 개체로 두고, 다수의 해로 이루어진 집단을 형성한다. 형성된 집단은 유전적 메커니즘을 컴퓨터 알고리즘으로 모방한 유전 연산을 통해 인위적인 집단적 진화가 발생하고 그 과정에서 최적해가 도출된다. 이러한 GA는 광대역 탐색이 가능하므로 함수의 최적화, 동적시스템의 파라미터 추정 및 제어 등 다양한 분야에 적용되고 있다.

3.3.2 유전 알고리즘의 기본 용어

GA를 실행하기 위해서는 해결하고자 하는 문제를 유전 연산에 적합한 형식으로 구성하고, 필요한 각종 파라미터를 설정해야 한다. GA는 기본적으로 다음의 요소들로 구성된다.

‘염색체(chromosome)’는 문제에 대한 해를 GA가 이해하는 형태로 표현한 것이다. 일반적으로는 가능해를 나타내는 일차원 배열이다. ‘유전자(gene)’는 염색체를 구성하는 각 단위 요소로, 일반적으로는 일차원 배열에 들어가는 데이터를 뜻한다. ‘해집단(population)’은 다수의 염색체로 이루어진 집단으로 다수 해의 모임을 나타낸다. ‘유전 연산자(genetic operator)’는 GA의 핵심적인 요소로, 집단의 진화를 유발하는 유전 현상을 모방한 선택, 교차, 돌연변이와 같은 연산자가 있다. Table 3.1은 유전 연산자의 예를 나타낸다.

Table 3.1 Genetic operators of genetic algorithm.

Operator	Note
선택 (selection)	교차에 쓰이는 두 개의 부모해를 고르는 연산으로 우수한 해가 선택될 확률이 높다. ex) 룰렛 휠 선택, 토너먼트 선택, 순위 선택 등
교차 (crossover)	두 해의 특징을 부분 결합하여 하나의 새로운 해를 만드는 연산으로, GA를 대표하는 연산이다. ex) 일점 교차, 다점 교차, 균등 교차 등
돌연변이 (mutation)	부모해에 없는 속성을 자식해에 도입하는 연산으로 다양한 해를 형성하여 탐색 공간을 넓힌다. ex) 전형적 변이, 비균등 변이 등

‘세대(generation)’는 개체군을 진화의 순서에 따라 구분한 것으로, 유전 연산을 거친 후 새롭게 생성된 해집단은 다음 세대를 형성한다. 이는 진화의 단계를 나타낸다. 또한 GA는 목적함수를 최대화 또는 최소화하는 방향으로 진화가 일어난다. ‘목적함수(objective function)’는 해를 탐색하고 진화가 일어나는 기준이 된다. 보편적으로 ITAE(Integral Time Absolute Error), IAE(Integral Absolute Error), ISE(Integral Square Error) 등이 널리 사용되지만, 설계자의 목표에 따라 다양한 형태로 구성될 수 있다. 비용함수, 적합도 함수라고도 한다. ‘적합도(fitness)’는 주어진 염색체가 문제의 해에 근접한 정도를 나타낸다. 적합도가 큰(작은) 염색체일수록 선택되어 다음 세대로 유전될 확률이 높다. ‘제약 조건(constraints)’은 최적해를 탐색할 때 해의 크기나, 범위 등을 제한하는 조건을 뜻한다. 문제에 따라 여러 가지 형태로 구성될 수 있다. GA는 어느 기준을 만족할 때까지 유전 연산을 통해 진화하면서 최적해를 탐색하는데, 이 기준을 ‘중지 기준(termination criterion)’이라고 한다. 중지 기준으로는 세대, 시간, 목적함수의 값 등을 설정할 수 있다.

3.3.3 유전 알고리즘의 표현

GA를 실행하기 위해서는 모든 해는 염색체로 표현되어야 한다. 초기의 GA는 이진수 표현을 사용했으나, 시간이 지나면서 다양한 형태의 표현 방식이 등장하였다. Table 3.2는 GA에 이용되는 표현 예를 나타낸다.

Table 3.2 Representations of chromosome in genetic algorithm.

Representation	Note
이진수 표현	0과 1로 염색체를 표현한다. 염색체의 길이가 길고 유전자가 의미를 나타내는 인자와 일대일 대응이 어렵다.
k -진수 표현	k -진수(2, 8, 10, 16진수) 등이 있다.
실수 표현	수의 크기 개념을 연산에 담을 수 있고, 인자들의 속성이 실수일 경우 인자와 유전자가 일대일 대응한다.
그레이 코딩	이진수 표현의 한 갈래로 인접한 수는 단 한 비트 차이가 난다.
그 외	가변 표현, 순서 기반 표현, 트리 표현 등이 있다.

3.3.4 유전 알고리즘의 프로세스

Fig. 3.3은 GA가 실행되는 진행 프로세스를 나타내는 흐름도를 나타낸다. GA를 실행하기에 앞서, 최적화 문제에 대해 해를 표현하는 방식, 최적화 목적을 나타내는 목적함수, 제약 조건 그리고 유전 연산 단계에서 이용할 유전 연산자, 중지 기준 등을 먼저 선정하여야 한다.

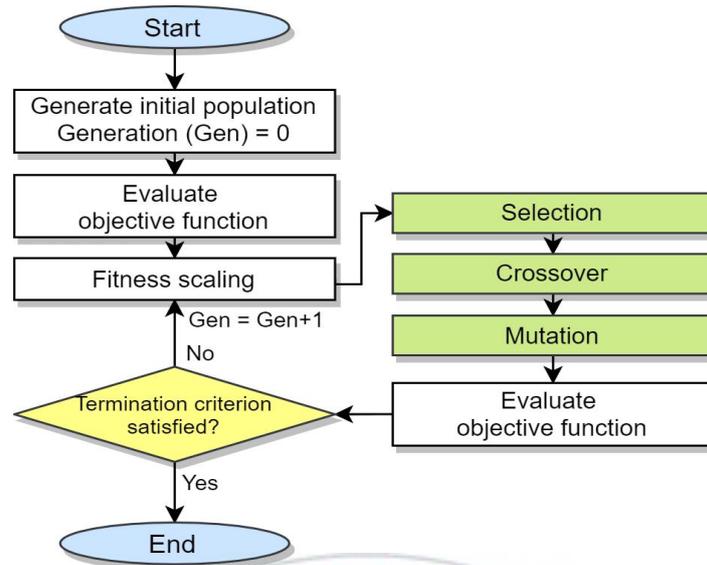


Fig. 3.3 Flow chart of genetic algorithm.

GA는 선정된 조건에 맞추어 n 개의 초기 해집단을 무작위적으로 형성하여 제0세대($G=0$)를 구성한다. 구성된 해집단의 각 염색체는 목적함수 값을 기준으로 적합도 평가가 이루어진다. 적합도 평가 결과를 기반으로 적합도가 높은 염색체는 부모해로 선택될 확률이 높아진다. 선택 연산자에 의해 두 개의 염색체가 선택되고 한 쌍의 염색체를 형성하는데, 이러한 방식으로 다수의 부모 염색체가 형성된다. 이후, 교차 연산자에 의해 각 부모 염색체에서 일부 유전자가 교차되어 자식 염색체가 형성된다. 이 과정에서 변이 연산자에 의해 염색체의 일부 유전자가 변형되는 돌연변이가 확률적으로 발생할 수 있다. 이러한 과정을 통해 부모 세대와는 다른 n 개의 자식 염색체들로 구성된 자식 세대가 형성되고, 이는 제1세대($G=1$)가 된다. 이렇게 생성된 세대는 중지 기준의 만족 여부에 따라 알고리즘을 계속 진행할지, 중지할지 판단하게 된다. 중지 기준에 미치지 못할 경우, 제1세대는 목적함수를 기준으로 적합도 평가가 진행되며 위에서 언급된 연산 과정들은 알고리즘이 중지 기준을 만족할 때까지 반복 시행된다.

3.4 유전 알고리즘을 이용한 하중 행렬의 최적화

본 논문에서는 다음의 설계 사양을 만족하는 최적 서보 제어기를 설계하고자 한다. 먼저, 오일출구온도 T_o 를 주 제어량으로, 과열도 T_s 를 보조 제어량으로 본다. 오일출구온도에 대해서는 지령값 변경 시 정착시간 ($t_s, \pm 2\%$)이 1,600 초 이내, 퍼센트 언더슈트(P.U)가 5% 미만 이도록 설계 사양을 설정하였다. 과열도 제어에는 엄격한 제어 설계 사양이나 기준은 두지 않았으나, 제어 변수 간의 간섭 영향에도 오일출구온도와 비슷한 시간 내에 정착하도록 기준을 두었다. 이때, 오일출구온도 제어 시 적분기에 의한 적분 누적 포화를 방지하기 위해 Anti-windup 게인도 추가로 설계하였다. 따라서, 위에서 언급한 제어기 설계 사양은 Anti-windup 게인을 포함했을 때의 설계 사양이다.

GA를 적용하기 위해서는 최적화 문제를 정의해야 한다. 본 논문에서는 최적 서보 제어기의 설계 파라미터인 하중 행렬 R_a 가 GA의 최적화 대상이 된다. 하중 행렬은 실수(real number) 크기를 다루기 때문에, 염색체 표현에는 실수 표현 방식인 실수 코딩 유전 알고리즘(real coded genetic algorithm)을 이용하였다. 이 방식은 제약 조건을 갖는 최적화 문제 해결에 적합하다고 알려져 있으며³³⁾, R_a 의 각 요소와 염색체의 유전자가 일대일 대응하므로 크기 표현이 쉽다.

본 논문에서 다루고 있는 가변속 냉동시스템의 제어입력은 2개이므로 $m=2$ 이며, 따라서 $R_a(m \times m)$ 는 식(3.22)와 같이 나타난다.

$$R_a(2 \times 2) = \begin{bmatrix} r_{11} & 0 \\ 0 & r_{22} \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

여기서, 제어기 설계 과정에서는 각 제어 변수 간의 간섭 영향을 무시하고 독립적 관계로 취급하였으므로 R_a 의 반 대각선 성분은 0으로 나타

난다. 이는 제어기 설계 과정을 더욱 단순하고 쉽게 만든다. GA를 적용하기 위해 R_u 를 염색체 X 로 정의하면 식(3.23)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 r_{11} 은 오일출구온도 T_o 를 제어하기 위한 압축기 인버터 주파수 f_i 에 대한 하중을, r_{22} 는 과열도 T_s 를 제어하기 위한 EEV 개도 V_o 에 대한 하중을 나타내며, 모두 실수로 나타난다.

$$X = [x_1 \ x_2] = [r_{11} \ r_{22}] \quad (3.23)$$

본 논문에서는 오일출구온도 제어를 위해, 긴 시간 동안 지속되는 오차를 억제하기에 적합한 식(3.24)의 ITAE를 GA의 목적함수로 선정하였다. 하중 행렬에서 각 요소는 0보다 커야 하므로 제약 조건으로 $r_{11}, r_{22} > 0$ 를 설정하였다. 또한 제어기 설계 사양을 만족시키기 위해, 오일출구온도 제어에는 $1,590s < t_s < 1,600s$ 와 $P.U < 5\%$ 를 제약 조건으로 추가하고, 과열도 제어에는 $t_s < 1,600s$ 와 $T_s < 15^\circ\text{C}$ 를 제약 조건으로 설정하였다. 오일출구온도 제어의 적분 누적 포화 방지를 위해 추가된 Anti-windup 게인은 상태 피드백 게인 K_1 대하여 $0.5K_1$ 이 되도록 선정하였다.

$$ITAE = \int_0^{\infty} t|e(t)|dt \quad (3.24)$$

이상의 조건들로 GA의 실행은 MATLAB의 'GA solver'를 이용하였고, 해집단의 크기는 '50', 염색체 X 는 $1 \leq X \leq 1,000$ 범위에서 균등 분포를 이용하여 무작위로 초기 해집단이 형성되도록 하였다. 적합도 스케일링 연산은 '순위', 선택 연산은 '룰렛 휠', 교차 연산은 '산술적, 비율 0.8', 변이 연산은 '적응적 가능'으로 각각 설정하였다. GA의 중지 기준은 세대수가 50이 되거나 목적함수 값의 평균 변화가 $1e-6$ 이하인 경우로 하였

다. MATLAB/Simulink를 통해 GA를 실행하고 하중 행렬 R_a 를 최적화하는 프로세스를 Fig. 3.4에 나타내었다. 이에 따라 GA를 통해 설계 사양을 만족하는 최적화된 R_a 의 요소 r_{11} , r_{22} 는 각각 267.86, 11.62로 선정되었다. 그에 따라 상태 피드백 게인 K_1 과 서보 게인 K_2 는 식(3.25)와 같이, Anti-windup 게인은 -9.82로 선정되었다. 따라서, GA를 통해 최적화된 하중 행렬 R_a 로써 설계된 최적 서보 제어기는 Table 3.3과 같다. 제어기 설계 시, GA의 실행에 이용한 MATLAB 프로그램은 Appendix(A.2)에 나타내었다.

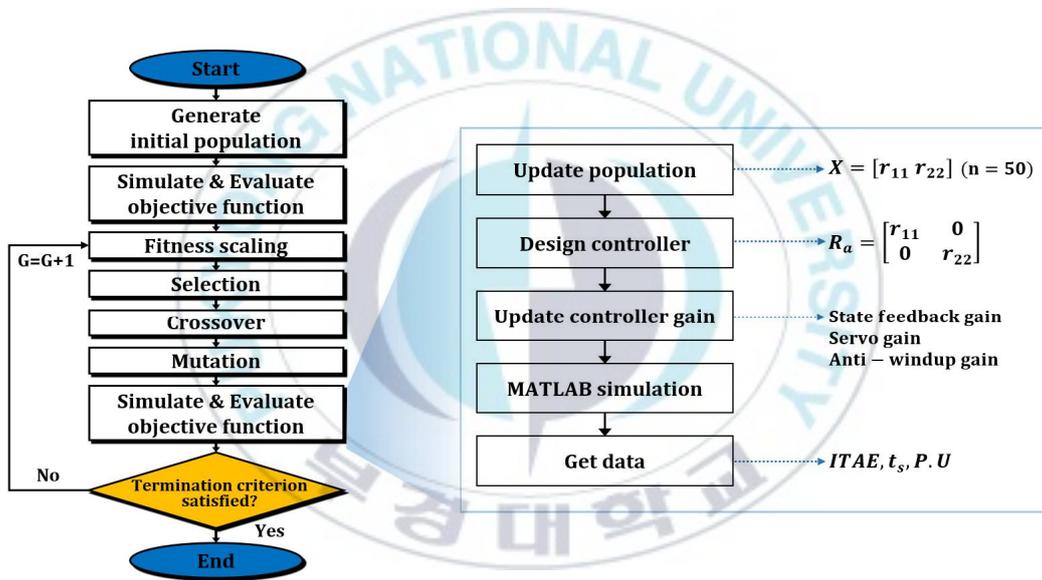


Fig. 3.4 Flow chart of genetic algorithm by MATLAB/Simulink.

$$K_1 = \begin{bmatrix} -19.65 & 0 \\ 0 & -14.75 \end{bmatrix}, K_2 = \begin{bmatrix} -0.06 & 0 \\ 0 & -0.29 \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

Table 3.3 Controller gains of optimal servo control system.

Component	State feedback gain	Servo gain	Anti-windup gain
Compressor	-19.65	-0.06	-9.82
EEV	-14.75	-0.29	-

제4장 강인한 온도 제어를 위한 외란 관측기 설계

최적 서보 제어기는 상태 공간 모델을 기반으로 설계되므로 다입·출력 계로 나타나는 VSRS에 대한 변수 취급과 제어기 설계가 용이하다. 또한 평가함수의 하중 행렬을 선정하는 것만으로도 제어 성능과 입력 에너지에 대한 최적성을 보장한다. 뿐만 아니라 서보계로 확장함에 따라 스텝 입력에 대해 엄밀히 추종하는 뛰어난 명령 추종 성능을 발휘한다. 따라서 최적 서보 제어기는 VSRS의 제어기로서 설계 측면에서 매우 유용함을 3장을 통해 알 수 있었다.

다만 제어대상의 수학적 모델은 실험을 통한 선형 근사화 전달함수 모델에서 유도된 상태 공간 모델을 이용하였기에 모델 불확실성을 내포한다. 모델 불확실성과 열부하 등의 외란, 센서로 유입되는 잡음은 제어계의 성능을 열화시키기 때문에 이에 대한 강인성을 확보할 필요가 있다. 따라서 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 이내로 더욱 엄밀한 온도 제어가 요구되는 오일출구온도에 대해서 제어 강인성을 확보하기 위해 외란 관측기(Disturbance Observer; DOB)를 추가로 설계한다. DOB는 최적 서보 제어계의 내부 루프(inner loop)에 위치하여 모델 불확실성 및 외란에 대한 강인성을 보장하고 제어기의 성능 열화를 방지한다.

4.1 외란 관측기 이론

DOB는 모델 불확실성과 외란이 시스템에 미치는 영향을 관측하고 이를 제어입력으로써 보상하는 형태로, 이론이 간단하고 구현이 쉬워 강인 제어를 포함한 외란 제거 제어에 널리 적용되고 있다³⁴. Fig. 4.1은 Q-필터를 갖는 일반적인 DOB의 기본 구조로, 최적 서보 제어계의 내부 루프에 위치하게 된다.

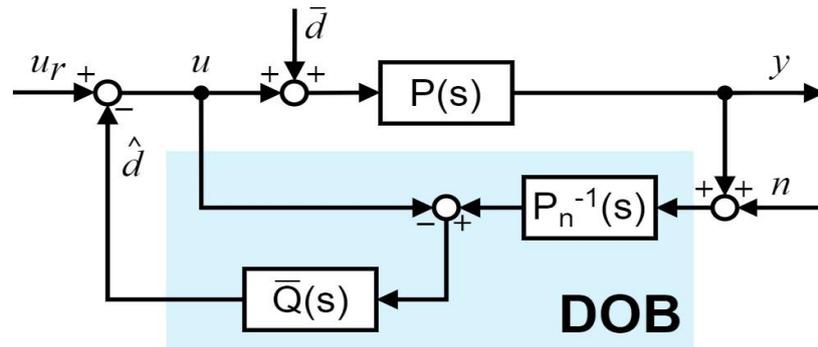


Fig. 4.1 Structure of disturbance observer.

Fig. 4.1에서 $P(s)$ 는 실제 시스템(제어대상)의 전달함수, $P_n(s)$ 는 시스템의 공칭(nominal) 전달함수, $\bar{Q}(s)$ 는 Q-필터의 전달함수, n 은 센서(sensor) 잡음(noise), u 는 제어입력, u_r 은 기존 제어기(최적 서보 제어기)에 의한 제어입력, \bar{d} 는 외란을 나타낸다.

DOB에서 Q-필터를 이용하여 외란을 추정하고 그 영향을 보상하는 원리는 다음과 같다. Fig. 4.1에서 출력 y 는 식(4.1)과 같이 나타낼 수 있고, 관측 외란 \hat{d} 은 식(4.2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$y = P(s)(u + \bar{d}) \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned} \hat{d} &= \bar{Q}(s)\{P_n^{-1}(s)(y+n) - u\} \\ &= \bar{Q}(s)[P_n^{-1}(s)\{P(s)(u + \bar{d}) + n\} - u] \end{aligned} \quad (4.2)$$

여기서 만약 $n=0$, $P(s) = P_n(s)$ 라고 가정하면, 관측 외란 \hat{d} 은 식(4.3)과 같다.

$$\hat{d} = \bar{Q}(s)\bar{d} \quad (4.3)$$

또한, 식(4.3)에서 $\bar{Q}(s)=1$ 이라고 가정하면, 결국 $\hat{d}=\bar{d}$ 가 되어 DOB는 실제 인가되는 외란을 정확히 추정하게 된다. 외란 \bar{d} 의 영향을 상쇄하기 위해 Q-필터의 출력은 $-\hat{d}$ 의 꼴로 기존 제어입력 u_r 에 보상됨으로써 $u = u_r - \hat{d} + \bar{d} = u_r$ 로 외란의 영향이 제거된다. 특히, 이러한 과정을 통해 DOB가 $P(s)$ 를 $P_n(s)$ 처럼 거동하게 함으로써 원하는 제어 성능을 보장하도록 하는 역할도 한다.

그러나 일반적으로 공칭 전달함수의 역 모델인 $P_n^{-1}(s)$ 는 분자의 차수가 분모의 차수보다 크기 때문에 실제로는 구현이 불가능하다(non-proper 문제). 따라서 이 문제를 해결하기 위해 $\bar{Q}(s)$ 를 이용하여 $P_n^{-1}(s)\bar{Q}(s)$ 가 구현이 가능하도록 $\bar{Q}(s)$ 즉, Q-필터를 설계한다. 보다 구체적으로는 $P_n^{-1}(s)\bar{Q}(s)$ 의 구현을 위해서는 $P_n^{-1}(s)\bar{Q}(s)$ 의 분모 차수가 분자 차수와 같거나 커야 한다. 여기서 $P_n^{-1}(s)$ 는 조절할 수 없으므로 $\bar{Q}(s)$ 의 차수를 조정함으로써 이 문제를 해결한다. 따라서 $\bar{Q}(s)$ 의 상대 차수(relative degree)=(분모의 차수 - 분자의 차수)가 $P_n(s)$ 의 상대 차수와 같거나 크도록 설계해 주면 $P_n^{-1}(s)\bar{Q}(s)$ 구현이 가능해지므로 DOB 구현 조건을 만족하게 된다.

또한, 외란 \bar{d} 에 대한 출력 y 의 전달함수 $G_d(s)$ 및 잡음 n 에 대한 출력 y 의 전달함수 $G_n(s)$ 는 각각 식(4.4), 식(4.5)와 같이 유도된다.

$$G_d(s) = \frac{y(s)}{\bar{d}(s)} = \frac{P(s)P_n(s)\{1 - \bar{Q}(s)\}}{P_n(s) + \{P(s) - P_n(s)\}} = P(s)\{1 - \bar{Q}(s)\} \quad (4.4)$$

$$G_n(s) = \frac{y(s)}{n(s)} = \frac{P(s)\bar{Q}(s)}{P_n(s) + \{P(s) - P_n(s)\}\bar{Q}(s)} = \bar{Q}(s) \quad (4.5)$$

여기서 $P_n(s) \approx P(s)$ 일 때, $\bar{Q}(s) \approx 1$ 이면 $G_d(s) \approx 0$ 이고 $G_n(s) \approx 1$ 이다. 이는 $\bar{Q}(s)$ 를 1에 가깝게 설계하면 외란을 상쇄시킬 수 있지만, 잡음의 영향을 제거하기 어려움을 뜻한다. 외란이 출력에 미치는 영향은 0에 근접한 반면 잡음의 영향이 출력에 그대로 나타남을 의미한다. 반대로 $\bar{Q}(s) \approx 0$ 이면 $G_d(s) \approx P(s)$ 이고 $G_n(s) \approx 0$ 이다. 이는 $\bar{Q}(s)$ 를 0에 가깝게 설계하면 측정 잡음을 억제할 수 있지만, 외란의 영향은 제거하기 어려움을 뜻한다. 이는 외란이 시스템의 전달함수 $P(s)$ 와 곱해져 출력에 영향을 미침을 뜻하며, 잡음이 출력에 미치는 영향은 거의 0임을 나타낸다. 이를 통해 DOB의 외란 제거 성능과 잡음 축소 성능은 상충(trade-off) 관계에 있음을 알 수 있다.

4.2 Q-필터 설계

일반적으로 Q-필터는 측정 신호 잡음과 고주파 입력의 증폭을 방지하기 위해 저역 통과 필터(low pass filter)로 설계되며, non-proper 문제를 해결하기 위해 Q-필터 $\bar{Q}(s)$ 의 상대차수는 시스템의 공칭 전달함수 $P_n(s)$ 의 상대차수와 같거나 커야 한다. 본 연구에서는 $\bar{Q}(s)$ 의 설계 편의성을 고려하여, 가능한 간단한 형태의 Q-필터인 이항(binomial) 필터를 사용한다^{35,36}.

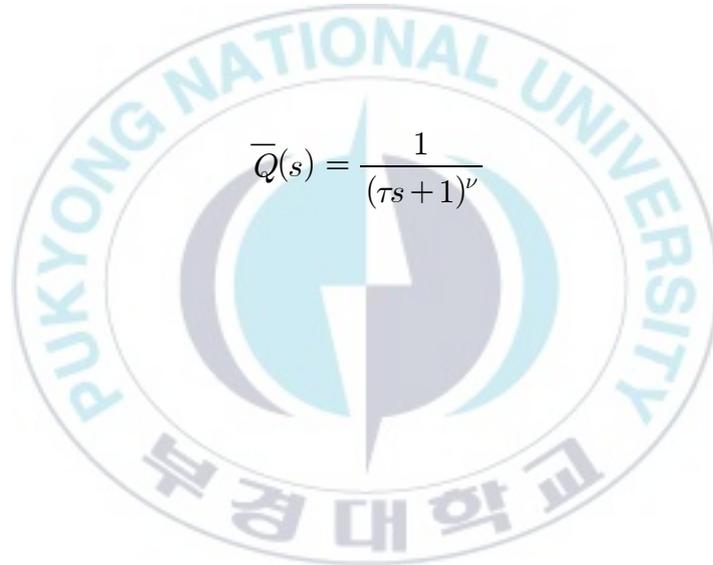
식(4.6)은 분모 차수(denominator order)가 m , 분자 차수(numerator order)가 n , 필터 시정수(time constant)가 τ 인 이항(binomial) 필터 $Q_{mn}(s)$ 를 나타낸다³⁶. 식(4.7)은 필터의 이항 계수(binomial coefficient) a_{mi} 를 나타낸다. 이 필터에서 상대차수(relative degree)는 $m-n$ 이다.

$$Q_{mn}(s) = \frac{\sum_{i=0}^n a_{mi} (\tau s)^i}{(\tau s + 1)^m} \quad (4.6)$$

$$a_{mi} = \frac{m!}{(m-i)!i!} \quad (4.7)$$

이항 필터에서 상대차수 $m-n$ 을 ν 라고 두고, 분자 차수를 $n=1$ 로 두면 식(4.6)은 식(4.8)로 간단히 정리된다. 식(4.8)의 $\bar{Q}(s)$ 는 상대 차수 ν 와 필터 시정수 τ 를 파라미터로 갖는 Q-필터를 나타낸다. 이 Q-필터에서는 τ 와 ν 가 작을수록 외란 제거 성능이 좋아지고, τ 와 ν 가 클수록 외란 제거 성능이 나빠진다. Q-필터의 설계 파라미터는 외란 제거 성능과 측정 잡음의 영향을 고려한 시뮬레이션을 통해 τ 는 50 초, ν 는 3으로 설정하였다.

$$\bar{Q}(s) = \frac{1}{(\tau s + 1)^\nu} \quad (4.8)$$



제5장 MATLAB 기반 시뮬레이션 결과 및 고찰

5.1 제어 성능 분석

5.1.1 시뮬레이션 조건 및 방법

Fig. 5.1은 3장에서 설계한 최적 서보 제어기를 외부 루프로, 4장을 통해 설계한 DOB를 내부 루프로 갖는 제어기 전체의 MATLAB/Simulink 시뮬레이션 블록선도이다. 시뮬레이션을 통한 제어기의 성능 검증 시, 제어계의 거동을 엄밀히 비교하기 위해, 제어 변수 간의 간섭 영향이 큰 $G_{i1}(s)$ 를 반영하였다. $G_{i1}(s)$ 는 인버터 주파수 f_i 가 과열도 T_s 에 미치는 영향으로 식(5.1)과 같이 모델링 되었다³⁷⁾. 또한, 외란 인가 시 제어계의 거동을 확인하기 위해 열부하 변동이 오일출구온도 T_o 에 미치는 영향을 나타내는 외란 전달함수 $G_d(s)$ 가 식(5.2)로 모델링 되었다. $G_{i1}(s)$ 와 $G_d(s)$ 의 모델링을 위한 동특성은 Appendix(A.3)에 나타내었다. 이러한 두 모델은 제어기 설계 시에는 반영되지 않았으며 시뮬레이션에만 반영되었다.

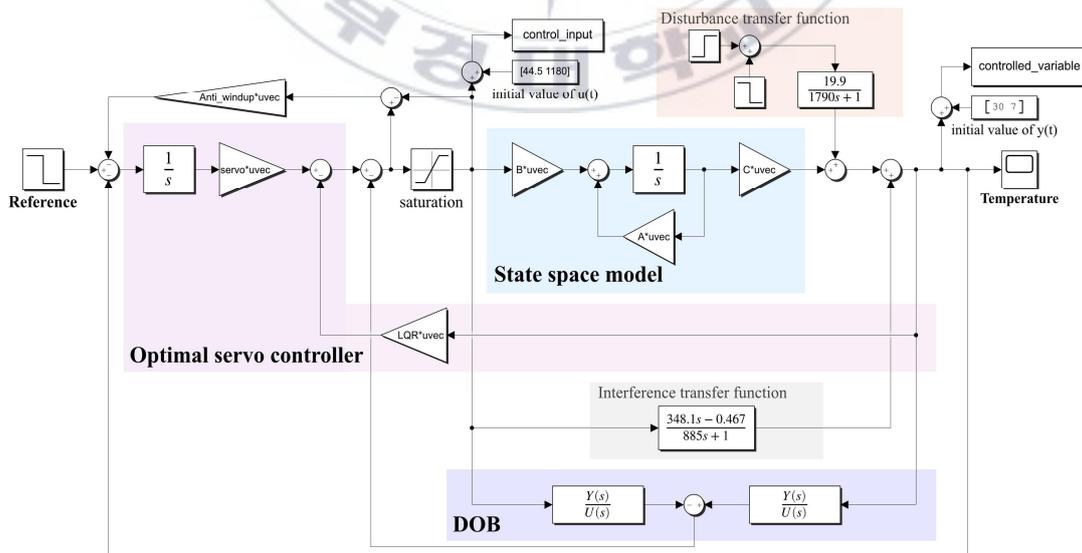


Fig. 5.1 MATLAB/Simulink program of optimal robust servo controller for simulations.

$$G_{i1}(s) = \frac{348.1s - 0.467}{885s + 1} \quad (5.1)$$

$$G_d(s) = \frac{19.9}{1790s + 1} \quad (5.2)$$

시뮬레이션은 크게 두 가지 경우로 나누어 진행된다. 첫 번째로는 DOB를 갖지 않는 최적 서보 제어기만의 단독 시뮬레이션을 실행한다. 이는 VSRS를 대상으로 설계된 최적 서보 제어기의 제어 성능과 그 특성을 검증하기 위함이다. 두 번째로는 DOB를 갖는 최적 서보 제어기(최적 강인 서보 제어기)의 시뮬레이션을 실행한다. 이는 DOB를 추가함으로써 최적 서보 제어기의 성능 향상, 특히 외란 보상의 영향을 확인하기 위함이다.

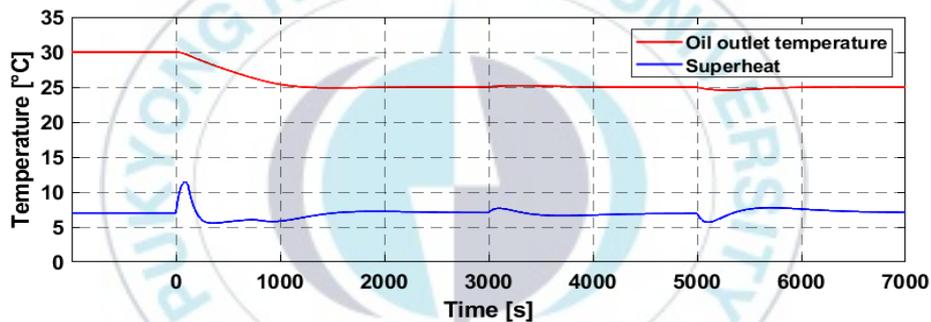
각 시뮬레이션은 지령값 변경과 외란 인가(열부하 변동)의 두 가지 조건에 대한 제어 성능 분석에 초점을 맞추었다. 시뮬레이션의 초기 조건으로 정격 열부하 1.68 kW 상태에서 오일출구온도는 30°C, 과열도는 7°C를 유지하였다. 지령값 변경은 1,000 초에 오일출구온도의 지령값만을 30°C에서 25°C로 변경하여 명령 추종성을 확인한다. 외란 인가의 경우, 지령값을 고정시킨 상태에서 4,000 초에 정격 열부하의 10%를 증가시킨 1.85 kW, 6,000 초에 정격 열부하의 10%를 감소시킨 1.51 kW로 변경하였다. 이들 각 시뮬레이션 조건을 Table 5.1에 나타내었다.

Table 5.1 Conditions of simulations and experiments for each time period.

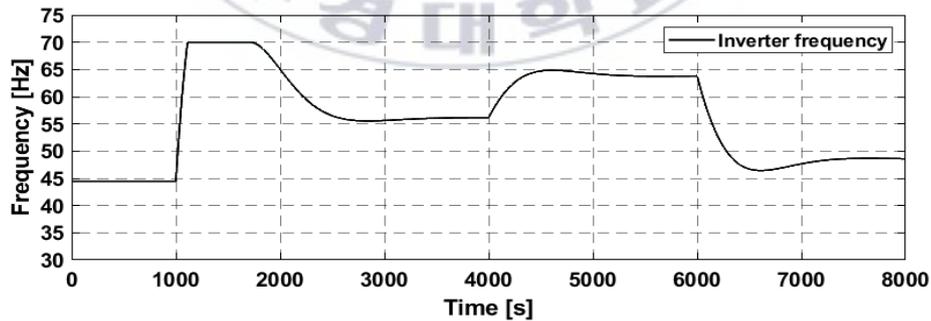
Time period [s]	0-1,000	1,000-4,000	4,000-6,000	6,000-8,000
Reference of T_o [°C]	30	25	25	25
Reference of T_s [°C]	7	7	7	7
Heat load [kW]	1.68	1.68	1.85	1.51

5.1.2 최적화된 하중 행렬의 타당성 및 서보 제어 성능 분석

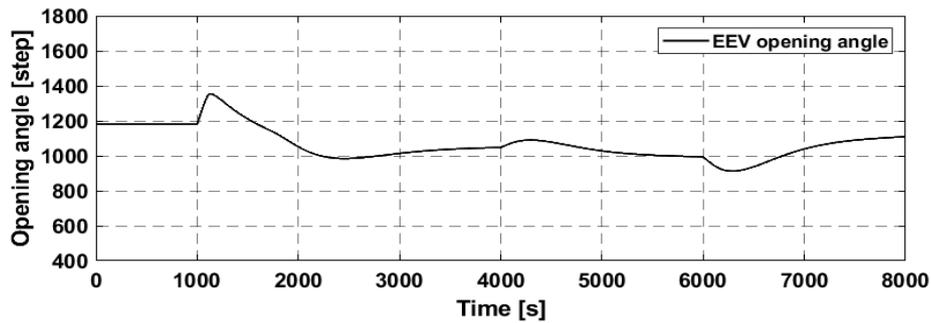
Fig. 5.2는 설계된 최적 서보 제어기의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 지령값 변경 시 오일출구온도 제어의 정착시간은 1,590 초, 퍼센트 언더슈트는 2.06%로 제어기의 설계 사양을 만족한다. 이를 통해 유전 알고리즘 (GA)을 이용하여 최적화된 최적 서보 제어기의 핵심 설계 파라미터인 하중 행렬 R_a 의 설계가 타당함을 알 수 있다. 또한, 설계된 제어기는 지령값 변경 및 외란 인가 시에도 오일출구온도 및 과열도를 정상상태오차 없이 목표 온도로 엄밀히 제어함을 알 수 있다. 이를 통해 서보 제어 성능을 확인할 수 있다.



(a) Responses of T_o and T_s .



(b) Control input of compressor



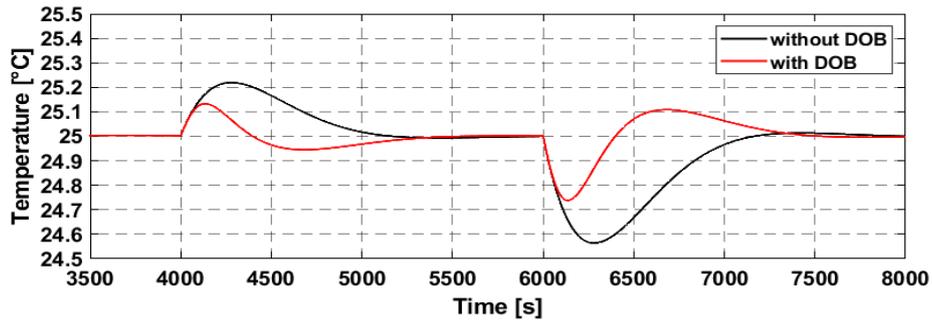
(c) Control input of EEV

Fig. 5.2 Simulation results of optimal servo controller.

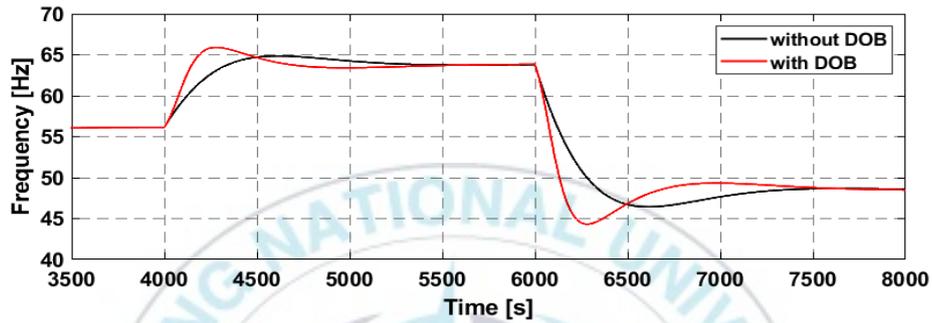
5.1.3 외란 관측기의 타당성 및 외란에 대한 강인성 분석

설계된 DOB의 설계 타당성 및 제어 강인성을 확인하기 위해 DOB 적용 유·무에 따른 외란 인가 시뮬레이션을 실시한다. 외란은 실험을 통해 얻은 열부하 특성 전달함수 식(5.2)의 형태로 제어량의 출력측에 인가된다. 열부하 외란에 대한 성능은 오일출구온도 25°C, 정격 열부하 1.68 kW를 기준으로 4,000 초에 열부하를 10% 증가시킨 1.85 kW, 6,000 초에 열부하를 10% 감소시킨 1.51 kW를 인가하여 평가한다.

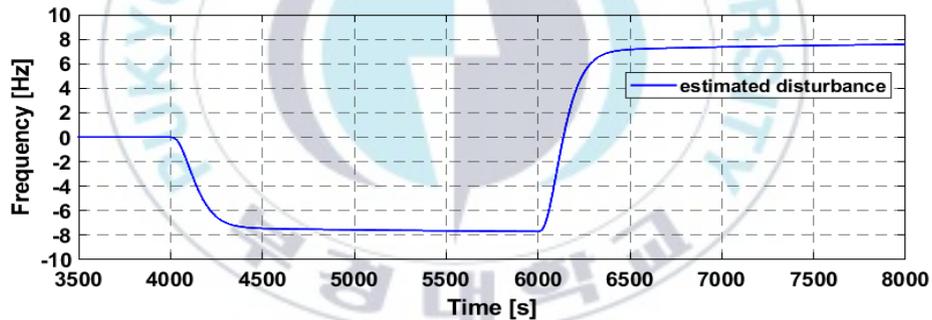
Fig. 5.3은 최적 서보 제어기에 DOB를 적용하지 않은 경우(without DOB)와 적용한 경우(with DOB)의 외란에 대한 오일출구온도 제어 시뮬레이션 결과이다. 특히 (c)는 DOB에 의해 관측된 외란 \hat{d} 을 나타내며, 이는 기존 제어입력에 $-\hat{d}$ 의 형태로 보상된다. 이를 통해 (b)에서 보듯이 인버터 주파수 f_i 의 빠른 응답이 유발되어 4,000 초~8,000 초 구간에서 열부하 외란에 대한 제어(과도) 성능이 현저히 개선됨을 볼 수 있다.



(a) Oil outlet temperature



(b) Inverter frequency



(c) Estimated disturbance of DOB

Fig. 5.3 Simulation results of optimal servo controller with and without DOB.

DOB의 영향을 정량적으로 분석하기 위해 Fig. 5.3으로부터 열부하 변동으로 인해 발생한 최대 과도 오차와 목표 온도 $25^{\circ}\text{C}(\pm 0.1^{\circ}\text{C})$ 로 제어되는 정착시간을 각각 관찰한다. Table 5.2는 그 결과를 나타낸다. DOB를 적용한 경우가 적용하지 않은 경우에 비해, 최대 과도 오차 크기가 0.17°C 작았고, 정착시간은 최대 449 초 빨랐다. 결과적으로 DOB를 적용한 경우가

과도 오차의 발생이 작을 뿐 아니라 정상상태로 빨리 정착하여 더 안정적인 제어 거동을 보임을 알 수 있다. 이를 통해 외란에 대한 DOB 적용의 타당성과 제어 강인성을 확인할 수 있다.

Table 5.2 Response characteristics of the simulation with and without DOB.

	Heat load increase		Heat load decrease	
	Max. transient error	Settling time	Max. transient error	Settling time
without DOB	$\pm 0.22^{\circ}\text{C}$	674 s	$\pm 0.43^{\circ}\text{C}$	836 s
with DOB	$\pm 0.13^{\circ}\text{C}$	225 s	$\pm 0.26^{\circ}\text{C}$	800 s

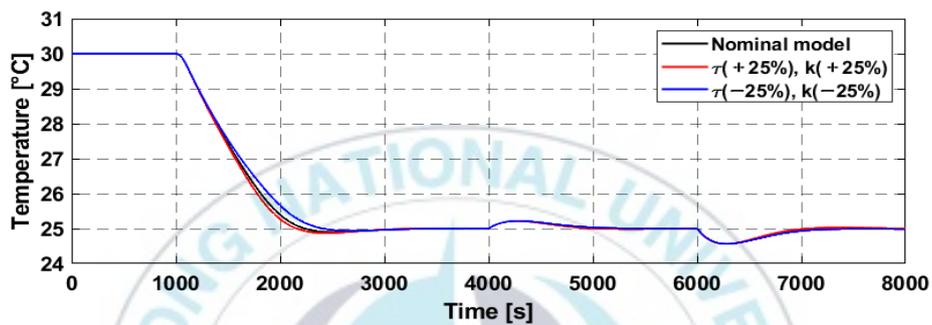
5.1.4 모델 불확실성에 대한 강인성 분석

설계된 최적 서보 제어기의 모델 불확실성에 대한 제어 강인성을 확인하기 위해 제어대상의 특성 파라미터가 변동한 경우의 시뮬레이션을 실시한다. 제어기 설계에 이용한 제어대상의 동특성 전달함수 모델은 매우 실용적이지만, 모델링 환경과 선형 근사화, 그리고 파라미터 동정 (identification) 과정에서 불가피하게 모델 불확실성이 발생한다. 모델 불확실성은 공칭 전달함수 모델의 시정수 τ 와 DC 게인 k 에 내포된다. 본 논문에서 이용한 VSRS 기반 오일쿨러 모델의 경우, 선행 연구에서 동작점 변경 시, 이들 특성 파라미터가 $\pm 23\%$ 로 가장 크게 변동하였다¹⁵⁾. 이를 고려하여 시뮬레이션에서는 $G_c(s)$ 의 τ 와 k 값을 동시에 최대 $\pm 25\%$ 변동시켜 모델 불확실성에 대한 최적 서보 제어기의 강인성을 확인한다. 이들 파라미터 변동으로 인한 제어 결과는 간섭항 전달함수 $G_{i1}(s)$ 을 통해 과열도에도 영향을 미친다.

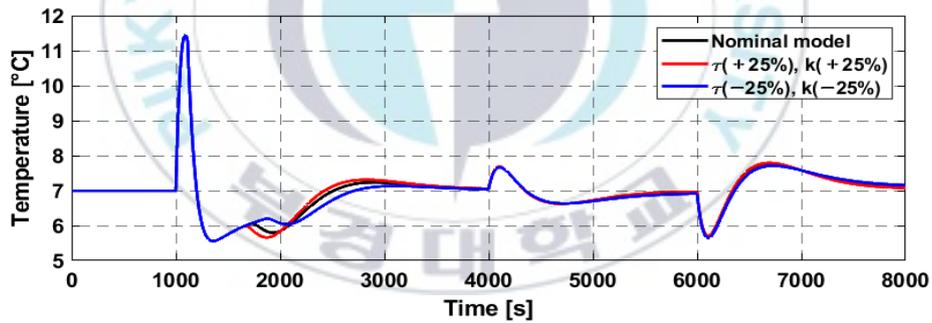
1) 최적 서보 제어기

Fig. 5.4는 DOB를 갖지 않는 경우의 최적 서보 제어 시뮬레이션 결과

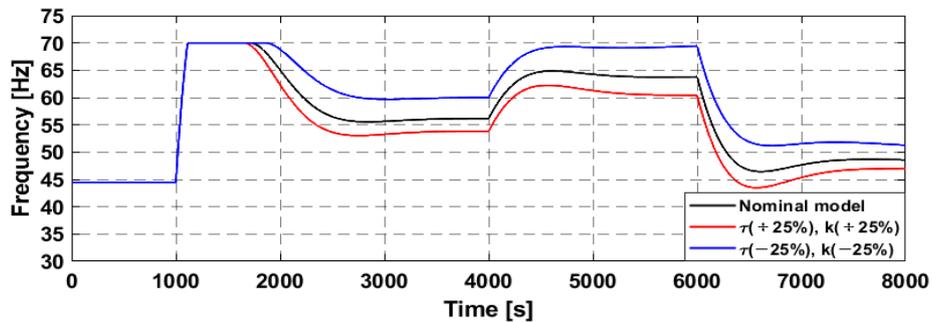
로 제어량과 제어입력을 각각 나타낸다. 제어대상의 특성 파라미터를 임의로 변동시킨 경우, 제어 성능이 공칭 전달함수를 적용한 경우에 비해 미소하게 달라짐을 확인할 수 있다. 그러나 과도상태에서의 미소한 응답 차이가 발생할 뿐 정상상태에서는 서보 제어기로 인해 정상상태오차 없이 지령값에 엄밀히 수렴한다. 이를 통해 모델 불확실성(파라미터 변동)에 대한 제어 강인 성능을 확인할 수 있다.



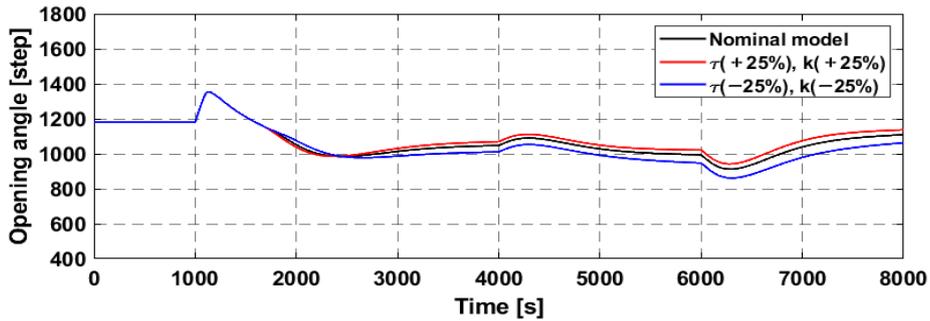
(a) Oil outlet temperature



(b) Superheat



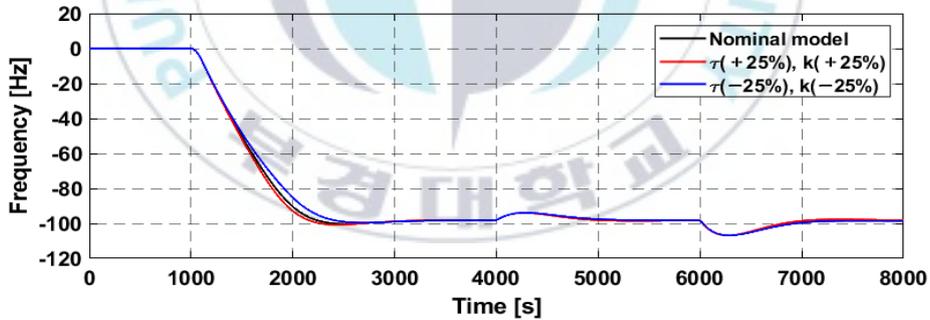
(c) Inverter frequency



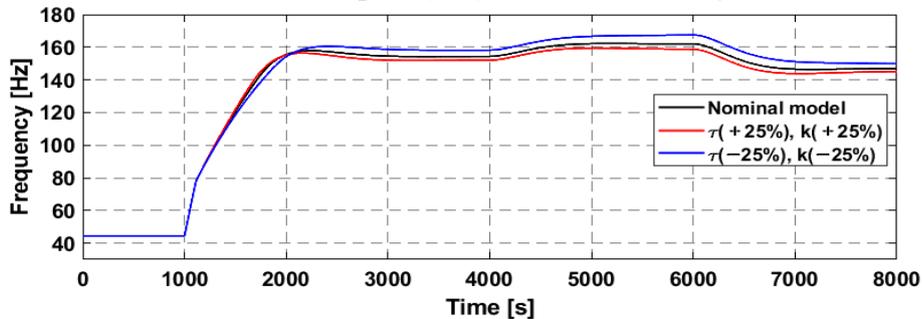
(d) EEV opening angle

Fig. 5.4 Simulation results to confirm robustness against model uncertainty.

최적 서보 제어기는 상태 피드백 게인과 서보 게인으로 구성되며, 최적 서보 제어기의 최종 제어입력은 각 게인에 의해 출력되는 제어입력의 합으로 나타난다. Fig. 5.5는 상태 피드백 게인과 서보 게인에서 출력되는 제어입력 중 오일출구온도를 제어하는 인버터 주파수 부분만을 나타내었다. (a)는 상태 피드백 게인에 의한 제어입력, (b)는 서보 게인에 의한 제어입력으로, (a)와 (b)의 합이 최종 제어입력이 된다.



(a) Inverter frequency by state feedback gain



(b) Inverter frequency by servo gain

Fig. 5.5 Control input of compressor by optimal servo controller.

Fig. 5.5를 살펴보면, (a)의 제어입력은 과도상태 구간에서 미소한 차이가 있을 뿐, 정상상태 구간에서는 파라미터 변동과 상관없이 동일하다. 반면 (b)의 제어입력은 전 구간에 걸쳐 파라미터 변동에 따라 과도상태와 정상상태에서의 값이 다르게 나타난다. 이를 통해 최적 서보 제어기의 서보게인이 제어대상의 파라미터 변동에 대응함으로써 모델 불확실성에 대한 강인성을 확보함을 알 수 있다.

Table 5.3은 Fig. 5.4의 파라미터 변동 시뮬레이션에서의 응답 성능 지표를 나타낸다. 이는 오일출구온도의 지령값 변경 시 정착시간과 퍼센트 언더슈트를 나타낸다.

Table 5.3 Response characteristics of the simulation according to parameter variation.

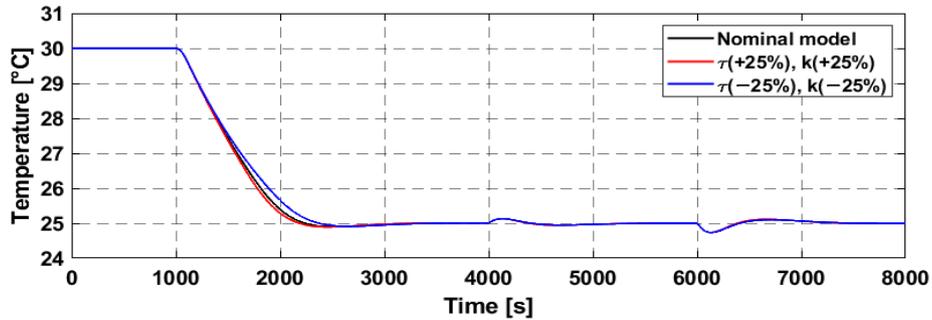
	Settling time $t_s (\pm 2\%)$	Percent undershoot $P.U$
Nominal model	1,590 s	2.06%
$\tau(+25\%), k(+25\%)$	1,652 s	2.58%
$\tau(-25\%), k(-25\%)$	1,296 s	1.31%

Table 5.3에서 모델의 특성이 변함에 제어 응답 특성이 달라짐을 명확히 확인할 수 있다. 특히, $\tau(+25\%), k(+25\%)$ 의 경우에는 제어기 설계 사양인 ‘정착시간 t_s 는 1,600 초 이내, 퍼센트 언더슈트 $P.U$ 는 5% 미만’이라는 조건이 충족되지 못함을 알 수 있다. 이를 통해 파라미터 변동 즉, 모델 불확실성에 의해 제어기의 성능이 열화됨을 확인할 수 있다. 따라서 이러한 모델 불확실성과 외란 등에 대한 제어기의 성능 저하를 방지할 수 있는 DOB의 필요성을 확인할 수 있다.

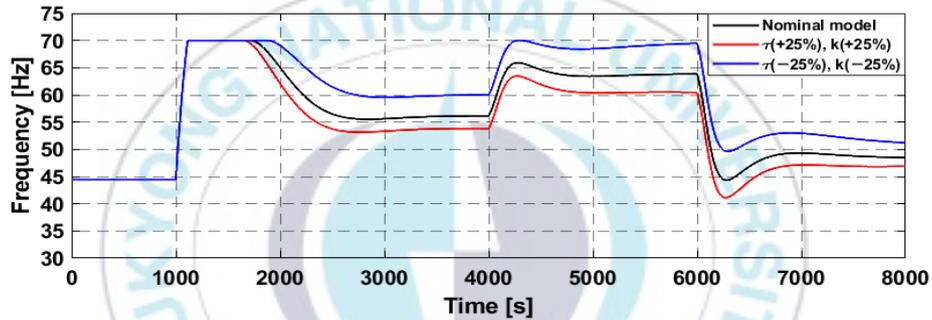
2) DOB를 갖는 최적 서보 제어기

Fig. 5.6은 DOB가 적용된 경우, 제어대상의 특성 파라미터 변동에 대한

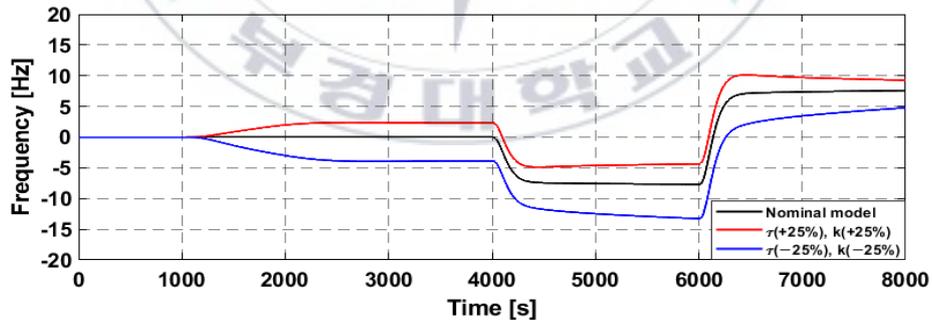
최적 서보 제어 시뮬레이션 결과로 오일출구온도와 인버터 주파수, DOB에서 관측된 외란 \hat{d} 을 각각 나타낸다.



(a) Oil outlet temperature



(b) Inverter frequency



(c) Estimated disturbance

Fig. 5.6 Simulation results of optimal servo controller with DOB against parameter variation.

Fig. 5.6에서 (c)는 공칭 모델과 파라미터 변동 모델 간의 차이가 DOB에 의해 관측된 외란 \hat{d} 을 나타낸다. 외란 보상은 관측된 외란 \hat{d} 이 $-\hat{d}$ 의

형태로 기존의 최적 서보 제어기의 제어입력에 더해짐으로써 이루어진다. (b)는 DOB에 의한 외란 보상 과정을 거친 제어입력인 인버터 주파수를 나타낸다. 파라미터 변동이 $\tau(+25\%), k(+25\%)$ 인 경우에는 DOB에 의해서 제어입력이 감소되고, $\tau(-25\%), k(-25\%)$ 인 경우에는 DOB에 의해서 제어입력이 증가됨을 확인할 수 있다.

Table 5.4는 DOB 적용 시, 파라미터 변동 시뮬레이션에서의 응답 성능 지표를 나타낸다. 표에서 괄호 안의 값은 DOB 미적용 시의 지표 값이다. DOB 적용에 따라 제어 성능이 달라짐을 확인할 수 있다.

Table 5.4 Response characteristics of the simulation according to DOB application against parameter variation.

	Settling time $t_s (\pm 2\%)$	Percent undershoot $P.U$
Nominal model	1,590 s (1,590 s)	2.06% (2.06%)
$\tau(+25\%), k(+25\%)$	1,566 s (1,652 s)	2.15% (2.58%)
$\tau(-25\%), k(-25\%)$	1,275 s (1,296 s)	1.79% (1.31%)

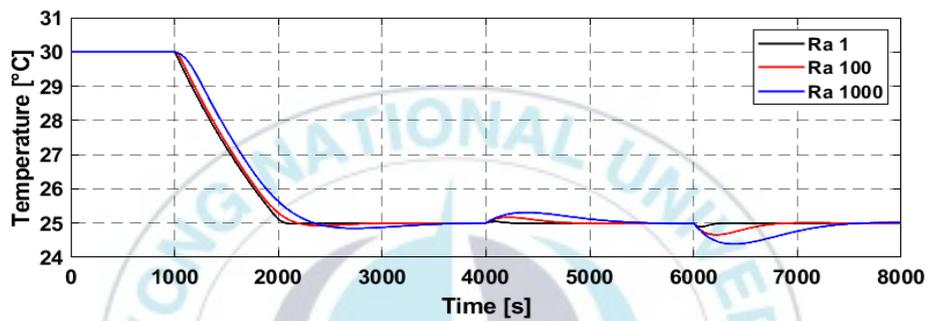
특히 모델 파라미터가 $\tau(+25\%), k(+25\%)$ 으로 변동한 경우, DOB 미적용 시에는 정착시간 t_s 가 1,652 초로 설계 사양을 충족하지 못했지만, DOB 적용 시에는 t_s 가 1,566 초로 설계 사양을 충족함을 알 수 있다. 이를 통해 모델 불확실성에 대한 DOB의 외란 보상 효과를 확인할 수 있으며, DOB 적용 필요성 및 타당성을 확인할 수 있다.

5.2 제어기 설계 파라미터의 영향 분석

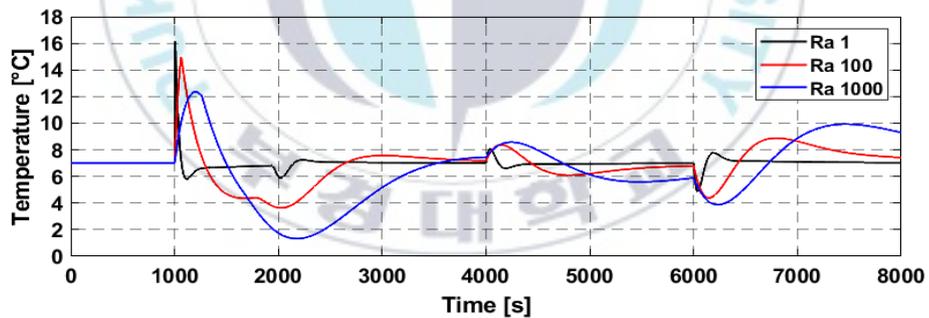
제어기 설계 시 고려되는 설계 파라미터는 최적 서보 제어기의 핵심 파라미터인 하중 행렬 R_o 를 결정짓는 GA의 각종 파라미터, DOB의 핵심 파라미터인 Q-필터가 있다. 본 절에서는 이 파라미터들이 제어기의 성능에 미치는 영향을 분석한다.

5.2.1 하중 행렬의 영향 분석

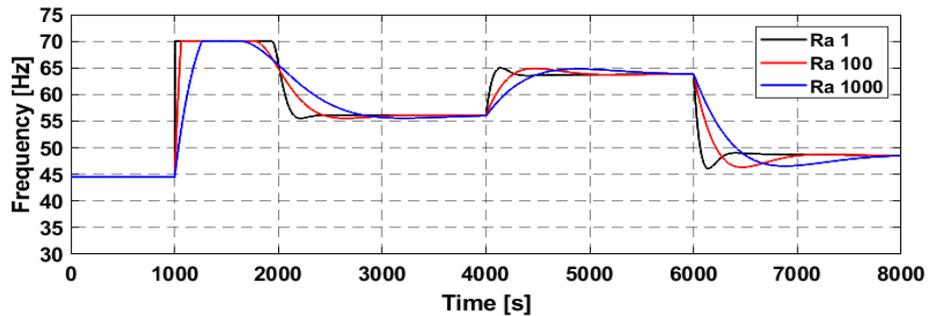
본 논문에서는 최적 서보 제어기의 핵심 설계 파라미터인 평가함수의 하중 행렬이 GA를 통해 번거로운 시행착오 과정 없이 설계된다. 제어기 설계에서 하중 행렬의 영향을 확인하기 위해, R_a 의 요소 r_{11}, r_{22} 를 동시에 1, 100, 1,000로 선정한 제어기를 설계한다. Fig. 5.7은 변경된 하중 행렬 R_a 를 갖는 최적 서보 제어기의 시뮬레이션 결과를 나타낸다.



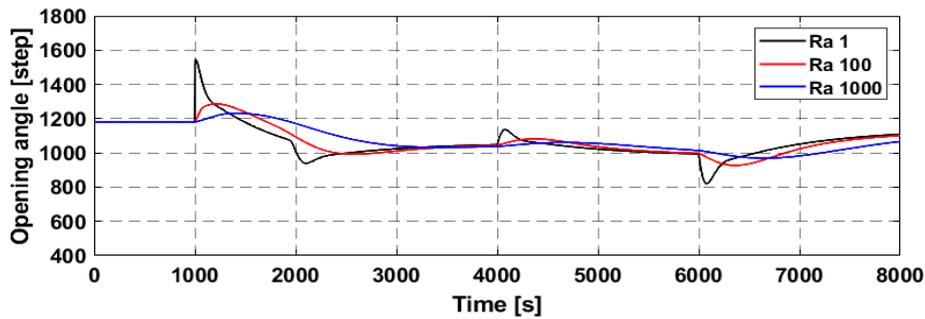
(a) Oil outlet temperature



(b) Superheat



(c) Inverter frequency



(d) EEV opening angle

Fig. 5.7 Simulation results according to weighting matrix change.

Table 5.5는 하중 행렬 R_a 의 변동 시뮬레이션에서 지령값 변경 시의 정착시간 t_s 와 퍼센트 언더슈트 $P.U$ 를 나타낸다. 하중 행렬 R_a 는 입력 에너지에 대한 하중이므로 일반적으로 R_a 가 커질수록 에너지가 적게 투입된다. 따라서 하중이 작을수록 에너지가 많이 투입되기 때문에 제어량의 응답 특성이 빨라진다. 반면에 하중이 클수록 에너지 투입이 제한되어 응답 특성이 느려짐을 확인할 수 있다.

Table 5.5 Response characteristics according to weighting matrix change.

		$r_{11}, r_{22} = 1$	$r_{11}, r_{22} = 100$	$r_{11}, r_{22} = 1,000$
T_o control	$t_s (\pm 2\%)$	1,008 s	1,104 s	2,124 s
	$P.U$	0.44%	1.55%	3.06%
T_s control	$t_s (\pm 2\%)$	1,300 s	3,094 s	5,062 s
	$P.U$	13.61%	42.18%	106.06%

Table 5.5에서 하중 r_{11} 과 r_{22} 가 1, 100, 1,000으로 같다고 하더라도 제어량이 T_o 인지, T_s 인지에 따라 성능 지표의 값이 다르다. 일반적으로 에너지에 대한 하중이 커지면 제어 성능이 저하하고, 하중이 작아지면 제어 성능이 향상되지만, 그 영향이 얼마만큼인지 정량적으로 알기는 어렵다. 또한 그 영향은 제어입력과 제어량이 무엇인지에 따라서도 달라진다. 이

러한 이유로 최적 서보 제어기의 하중 행렬 선정에는 많은 시행착오가 따르게 된다. 이를 통해 제어 변수가 많아질수록 하중 행렬을 선정하는 것이 더욱 어려워짐을 알 수 있다.

5.2.2 Q-필터 설계 파라미터의 영향 분석

DOB의 핵심인 Q-필터는 저역 통과 필터 형태로 설계되며 여기에는 주로 이항 필터가 자주 이용된다. 이항 필터는 4.2절에서 설명한 바와 같이 분모 차수 m , 분자 차수 n , 필터 시정수 τ 를 설계 파라미터로 갖는 식 (5.3)과 같다. 본 절에서는 DOB의 강인성 및 성능에 관한 연구를 참고하여 Q-필터 설계 파라미터의 영향을 분석한다³⁶⁾. Table 5.6은 식(5.3)을 기준으로, Q-필터를 구성하는 각 파라미터가 DOB의 성능에 미치는 영향을 나타낸다.

$$Q_{mn}(s) = \frac{\sum_{i=0}^n a_{mi} (\tau s)^i}{(\tau s + 1)^m} \quad (5.3)$$

Table 5.6 The effects of DOB parameters on control performance.

Parameter	Effect
$m-n$	<ul style="list-style-type: none"> • The small $m-n$, the better the robustness. • The larger $m-n$, the better the performance against the sensor noise.
m	<ul style="list-style-type: none"> • The larger m, the better the robustness.
n	<ul style="list-style-type: none"> • The larger n, the better the disturbance rejection performance.
τ	<ul style="list-style-type: none"> • τ determines the effective frequency range for disturbance rejection. • Small τ means wider frequency range for disturbance rejection. • Small τ makes the DOB more sensitive to the sensor noise.

여기서, 상대차수 $\nu(=m-n)$ 에 따라 외란에 대한 강인성과 잡음 축소성이 상호 충돌하는 요소임을 알 수 있다. 따라서 DOB의 Q-필터는 이러한 파라미터의 영향과 시스템의 외란 제거 성능, 잡음 축소 성능 등 필요 목적을 고려하여 설계하여야 한다.



제6장 실험 결과 및 고찰

6.1 실험 장치 및 실험 방법

본 논문은 제어대상인 VSRS 기반의 오일쿨러 시스템을 대상으로 온도 제어 성능을 확인하기 위해 지령값 변경 및 외란 인가(열부하 변동) 실험을 수행한다. 데이터 수집 및 실시간 제어를 위한 장치로는 PXIe(PCI eXtensions for Instrumentation)를 이용하였다. 제어 장치의 상세 정보는 Table 6.1에 나타내었다.

Table 6.1 Control system devices.

Device	Note
PXIe chassis	PXES-2301
PXIe controller	PXIe-3985
PXIe module	PXIe-6341
DAQ device	SCB-68A

Fig. 6.1은 실험에 사용되는 최적 서보 제어기(외부 루프) 및 DOB(내부 루프)의 MATLAB/Simulink 블록선도를 나타낸다. 온도 계측에는 K-type 열전대가 이용되었으며, MATLAB의 제어 로직을 통해 계산된 제어입력은 PXIe 장치를 통해 아날로그 전압(0~10 V) 지령으로 압축기 인버터 및 EEV 드라이브로 출력된다. 이 오일쿨러 시스템의 주 제어량은 오일출구 온도 T_o 로 인버터 주파수 f_i 에 의해 목표 온도로 제어된다. 부 제어량인 과열도 T_s 는 EEV 개도 V_o 에 의해 목표 온도로 제어된다. 실험은 Table 5.1에서 제시된 시뮬레이션 조건과 동일한 조건 하에서 시행된다.

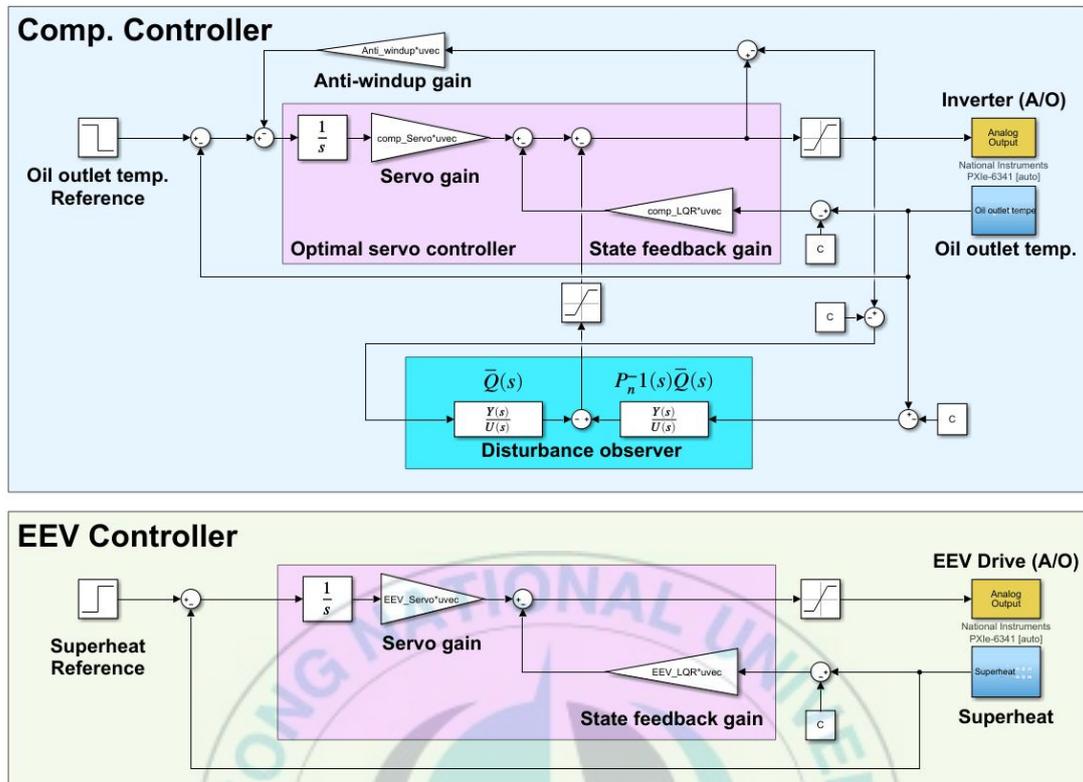
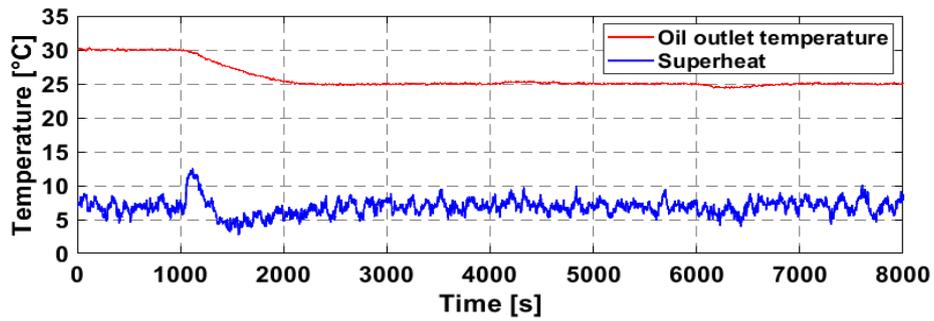
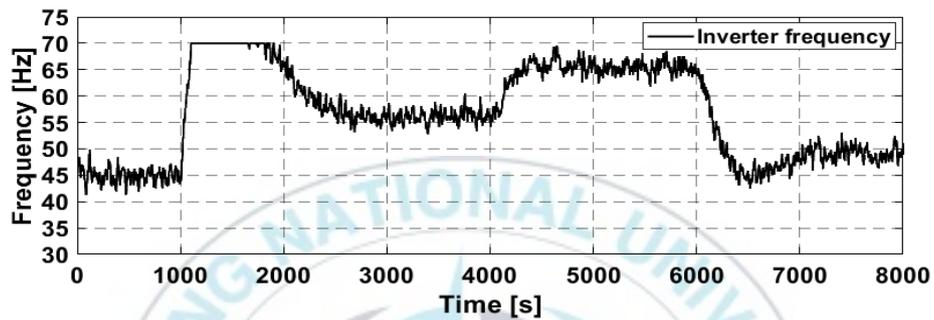


Fig. 6.1 MATLAB/Simulink program of designed controller for experiments.

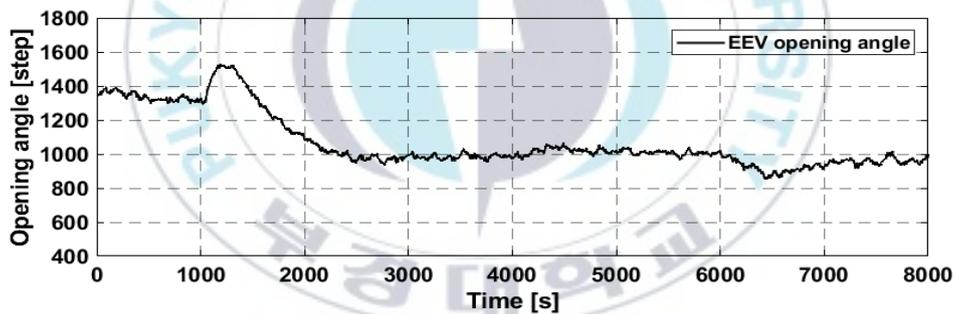
6.2 제어기의 성능 검증 및 분석

6.2.1 최적 서보 제어 실험 및 결과 분석

Fig. 6.2는 설계된 최적 서보 제어기에 의한 온도 제어 실험 결과를 나타낸다. (a)는 제어량인 오일출구온도와 과열도를 나타내며, (b)는 오일출구온도의 제어입력인 인버터 주파수, (c)는 과열도의 제어입력인 EEV 개도를 각각 나타낸다. 실험 결과, 정상상태에서 오일출구온도는 목표 온도인 25°C로, 과열도는 목표 온도인 7°C로 정상상태오차 없이 엄밀히 추종함을 알 수 있다.

(a) Responses of T_o and T_s 

(b) Control input of compressor



(c) Control input of EEV

Fig. 6.2 Experimental results of optimal servo controller.

1) 지령값 변경 실험

Fig. 6.2에서 오일출구온도의 지령값을 1,000 초에 30°C에서 25°C로 변경하면, 변경된 지령값을 추종하기 위해 (b)에서와 같이 인버터 주파수가 증가한다. 이때 과열도는 목표 온도인 7°C를 벗어나면서 큰 오버슈트가 발생한다. 이는 인버터 주파수가 과열도에 미치는 간접 영향에 기인한다.

이러한 간섭 영향은 식(5.1)을 통해 확인할 수 있다. 따라서, 제어기는 큰 오차가 발생한 과열도를 7°C로 제어하기 위해 (c)에서와 같이 EEV 개도를 증가시킨다. 오일출구온도가 정상상태로 정착하여 인버터 주파수가 일정 값으로 수렴하면 과열도 또한 정상상태에 도달하는 것을 확인할 수 있다.

지령값 변경 실험 결과, 오일출구온도 제어 시 과도 응답에서 발생하는 퍼센트 언더슈트 $P.U$ 는 4.1%이며, 정착시간 $t_s(\pm 0.1^\circ\text{C})$ 는 1,591 초이다. 이는 제어기 설계 사양인 $P.U < 5\%$, $t_s < 1,600$ 초 조건을 만족한다. 따라서 GA를 통해 결정한 하중 행렬 R_u 및 설계된 제어기의 타당성 또한 확인할 수 있다.

2) 외란 인가 실험

외란 인가 실험은 초기 조건으로 인가된 정격 열부하인 1.68 kW를 4,000 초에 10%를 증가시킨 1.85 kW로 변경하고, 6,000 초에는 10%를 감소시킨 1.51 kW로 변경하였다. 이러한 열부하 변동은 오일출구온도 제어에 영향을 미친다. 열부하가 증가했을 때는 25°C로 제어되던 오일출구온도에 최대 $\pm 0.3^\circ\text{C}$ 의 과도 오차가 발생한다. 이는 일정 시간이 지난 후 다시 목표 온도로 제어된다. 열부하가 감소했을 때는 최대 $\pm 0.55^\circ\text{C}$ 의 과도 오차가 발생하며 이 또한 일정 시간이 지난 후 다시 목표 온도로 제어된다. 이를 통해 최적 서보 제어기의 성능이 열부하 외란에 의해 다소 약화함을 확인할 수 있다.

6.2.2 외란 관측기를 갖는 최적 서보 제어 실험 및 결과 분석

Fig. 6.3은 DOB를 갖는 최적 서보 제어기에 의한 실험 결과이다.

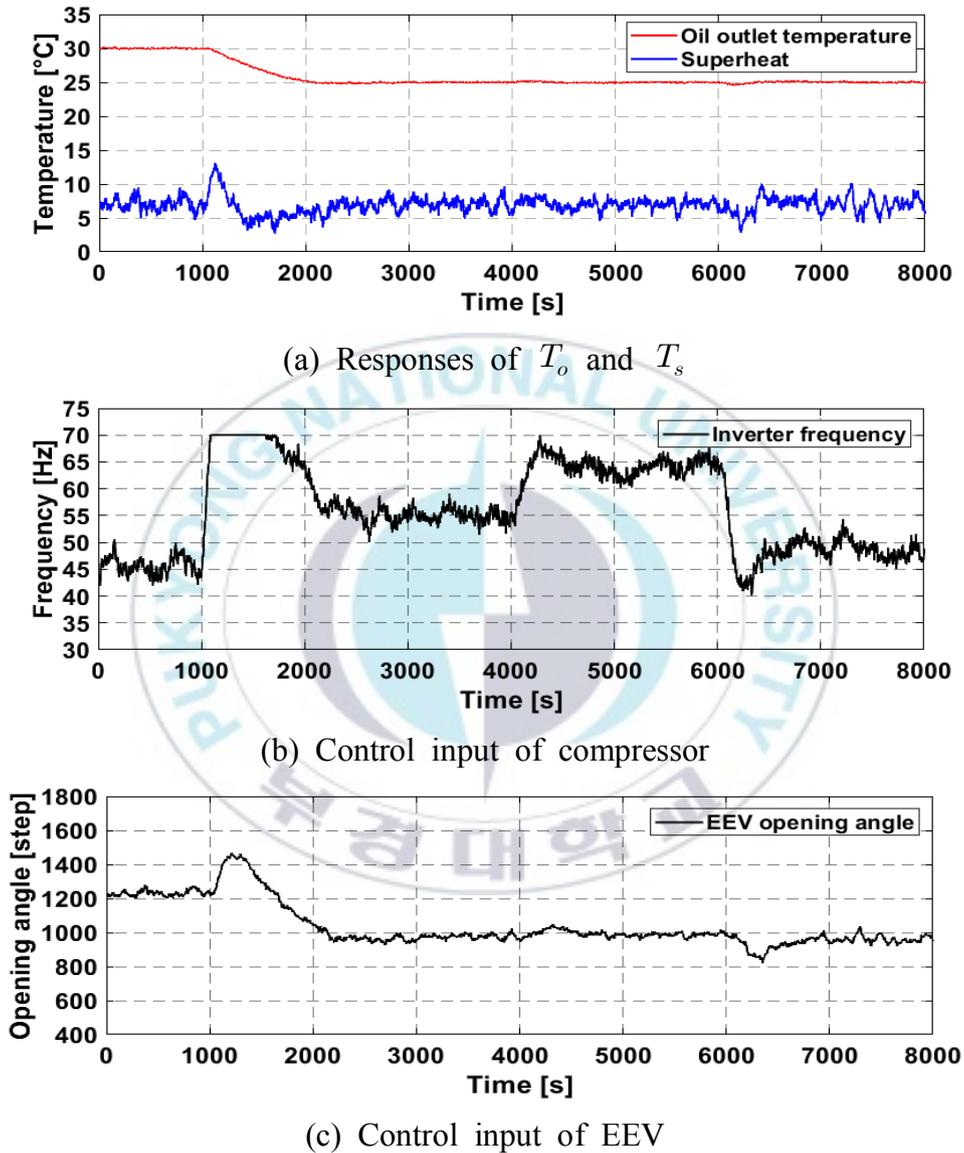


Fig. 6.3 Experimental results of optimal servo controller with DOB.

DOB는 외란이 인가되었을 때, 주 제어량인 오일출구온도의 과도 특성이 열화하는 것을 방지하기 위한 목적으로 도입되었다. 따라서 설계된

DOB의 제어 성능은 오일출구온도 제어와 그 제어입력인 인버터 주파수의 거동을 중점적으로 분석함으로써 검토된다. 또한, DOB를 갖는 최적 서보 제어기(Fig. 6.3)와 DOB를 갖지 않는 최적 서보 제어기(Fig. 6.2)의 제어 결과를 비교함으로써 DOB의 효용성을 검증한다.

1) 지령값 변경 실험

최적 서보 제어기의 단독 실험과 동일하게 DOB를 적용한 경우에도 오일출구온도의 지령값을 1,000 초에 30°C에서 25°C로 변경시켰다. 그 결과는 DOB가 적용되지 않은 경우와 흡사하다. 오일출구온도 제어 시 퍼센트 언더슈트 $P.U$ 는 3.1%이며, 정착시간 $t_s(\pm 0.1^\circ\text{C})$ 는 1,597 초이다. 실험 환경이 크게 다르지 않고, 외란이 없으므로 DOB 적용에 따른 제어 성능 차이는 거의 없음을 알 수 있다.

2) 외란 인가 실험

Fig. 6.3의 (a)에서 4,000 초, 6,000 초에 외란 인가 시 오일출구온도에 미치는 악영향을 DOB가 완전히 억제할 수는 없지만, 외란 보상에 의한 제어량의 열화 정도를 감소시켜 제어 성능을 현저히 개선함을 알 수 있다. Table 6.2에 DOB 적용 유·무에 따른 최대 과도 오차를 나타내었다. 이렇게 제안된 제어기는 외란이 가해지는 경우에도 오일출구온도의 정상 상태오차를 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 이내로 유지함을 확인할 수 있다.

Table 6.2 Experimental results of maximum transient error with and without DOB.

	Maximum transient error	
	Heat load increase	Heat load decrease
without DOB	$\pm 0.30^\circ\text{C}$	$\pm 0.55^\circ\text{C}$
with DOB	$\pm 0.16^\circ\text{C}$	$\pm 0.35^\circ\text{C}$

Table 6.2에서 볼 수 있듯이 외란 인가 시에는 DOB를 적용한 경우가 DOB를 적용하지 않은 경우보다 최대 과도 오차가 더 작음을 알 수 있다. 또한, 목표 온도로 정착하기까지 소요되는 시간도 더 단축된다. 이러한 결과는 내부 루프에 위치한 DOB가 오일출구온도에 발생한 외란을 관측하고 이를 외부 루프인 최적 서보 제어기의 제어입력에 보상하였기 때문이다.

Fig. 6.4는 DOB를 갖는 최적 서보 제어기 실험(Fig. 6.3)에서 DOB에 의해 관측된 외란 \hat{d} 을 나타낸다. 이는 외부 루프의 제어입력에 음의 값으로 보상된다.

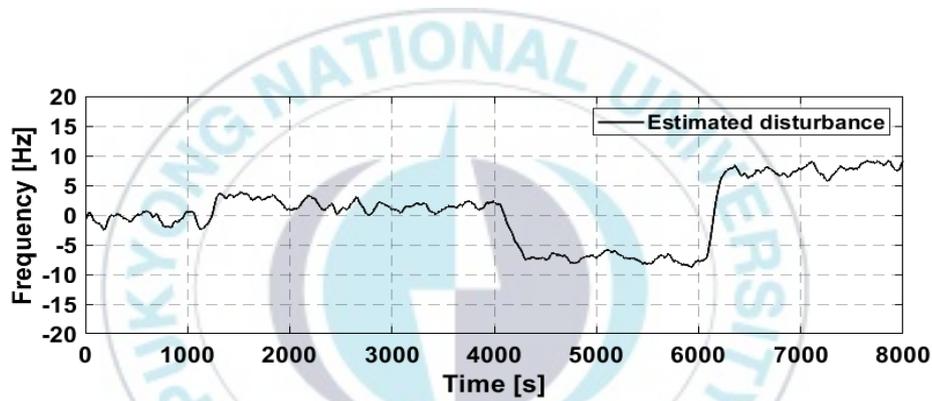


Fig. 6.4 Experimental result for disturbance compensation by DOB.

Fig. 6.4의 위 실험 결과에서, 외란이 인가되는 4,000 초 부근과 6,000 초 부근에는 관측 외란 \hat{d} 이 신속히 증·감된다. 이러한 결과로 Fig. 6.3(b)에서 외란이 인가되는 4,000 초, 6,000 초 직후 구간에서 인버터 주파수가 급격히 증·감하게 된다. 실제 외란 보상은 Fig. 4.1의 DOB 블록선도에서 나타낸 것과 같이 $-\hat{d}$ 의 형태이며, 이는 Fig. 6.4에서 나타나는 관측 외란 \hat{d} 의 증·감과는 반대로 나타난다. 이러한 결과를 통해 DOB가 외란에 대응하여 신속하게 제어입력을 보상하고 있음을 확인할 수 있다.

또한, 0~4,000 초 구간은 인위적인 외란 인가가 없었음에도 관측 외란

\hat{d} 이 0 Hz를 기준으로 조금씩 변동함을 알 수 있다. 이는 인위적인 외란 인가에 의한 영향이 아니라, 제어기 설계에 이용된 공칭 모델과 실험에서 실제 모델 간의 차이, 그리고 센서로 유입되는 측정 잡음이 DOB에서 외란으로 인식되고, 이것이 제어입력으로 보상됨을 나타낸다. 결국, DOB는 외란이 발생할 경우, 제어량인 오일출구온도를 목표값으로 신속히 추종하도록 함으로써 과도 오차를 작게 발생시킴과 동시에 빠르게 수렴시킨다.

6.2.3 잡음의 영향 분석

실제 실험에서는 시뮬레이션과 달리 온도 측정 센서(열전대)와 인버터 등에서 잡음이 발생하여 제어 성능에 영향을 미친다. 특히, DOB는 Q-필터 성능에 따라서 외란 제거 성능과 잡음 축소 성능이 결정된다. 따라서 설계된 DOB가 실제 실험에서 잡음의 영향으로 제어 성능을 발휘하지 못할 가능성이 있으므로 잡음에 대한 제어 성능을 확인하기 위해 잡음 인가 시뮬레이션을 시행하였다.

Fig. 6.5와 Fig. 6.6은 잡음에 대한 DOB의 제어 성능을 확인하기 위한 시뮬레이션 결과를 나타낸다. MATLAB/Simulink를 통해 강도 0.01의 백색 잡음(white noise)을 오일출구온도 측에 인가하였다. 그 결과, 잡음의 영향으로 제어 정밀도가 저하하는 것을 알 수 있다. 시뮬레이션 결과, 잡음에 의한 오일출구온도의 최대 변동폭은 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 로 나타났다. 이러한 결과는 DOB 적용 유·무와 상관없이 동일하게 나타났다. 이를 통해 본 논문에서 설계된 DOB가 잡음의 영향을 축소시키지는 못함을 알 수 있다. 다만, 외란이 인가되었을 때 DOB를 적용하지 않은 경우에는 최대 $\pm 0.7^{\circ}\text{C}$ 의 과도 오차가 발생했고, DOB를 적용한 경우에는 최대 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 의 오차가 발생했다. 이를 통해, 잡음이 인가된 경우에도 DOB가 문제없이 외란 제거 성능을 발휘함을 확인할 수 있다.

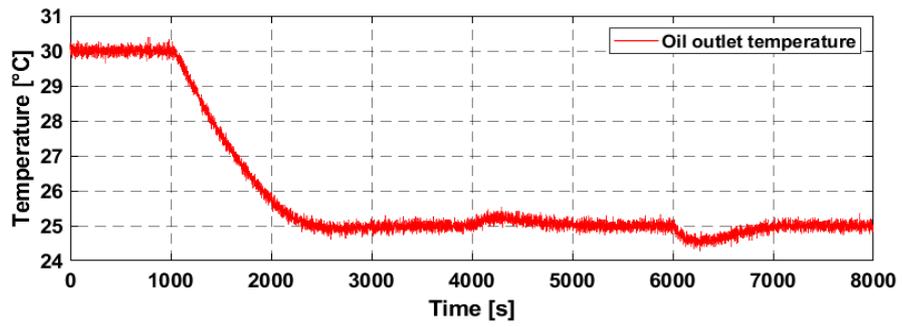


Fig. 6.5 Simulation result for noise addition without DOB.

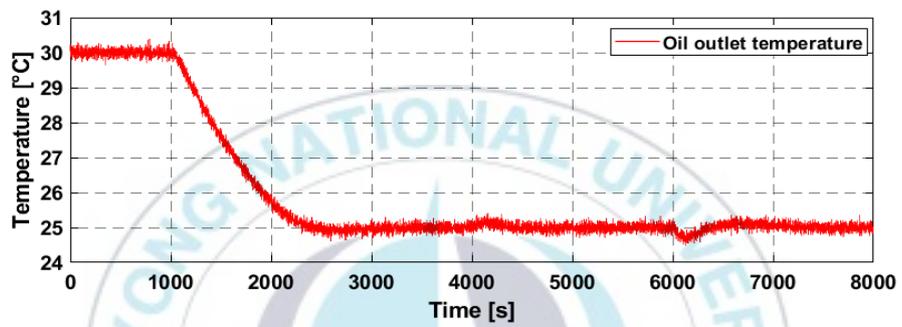


Fig. 6.6 Simulation result for noise addition with DOB.

제7장 결 론

본 논문에서는 가변속 냉동시스템의 실용적이면서도 강인한 온도 제어를 위해 외란 관측기를 갖는 최적 강인 서보 제어기를 설계하였다. 제어기 설계 시 상태 공간 모델은 실용적 전달함수 모델로부터 유도되었으며, 평가함수의 하중 행렬은 유전 알고리즘을 통해 시행착오 없이 체계적으로 선정되었다. 또한 저역 통과 필터 형태의 단순 Q-필터를 갖도록 설계된 외란 관측기는 모델 불확실성 및 외란에 대한 온도 제어 강인성을 확보하였다. 제안된 제어기는 가변속 냉동시스템 기반 오일쿨러를 대상으로 시뮬레이션과 실험을 통해 타당성이 검증되었다. 또한 제어량인 오일출구온도를 정상상태에서 허용 오차 범위 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 이내(오일쿨러의 최신 제어 정밀도 고려)로 제어하므로 제어기의 성능과 그 유효성이 입증되었다. 이를 통해 얻은 주요 결론은 다음과 같다.

- (1) 실용적인 저차원 상태 공간 모델을 기반으로 설계된 최적 서보 제어기는 모델 불확실성 및 열부하 외란 하에서도 정상상태에서 허용 오차 범위 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 내에서 오일쿨러의 온도를 정밀하게 제어하였다.
- (2) 저역 통과 필터 형태의 Q-필터를 갖는 외란 관측기(DOB)는 오일쿨러의 열부하가 급격하게 변하는 경우에도 외란의 영향을 신속하게 보상함으로써 오버슈트, 정착시간 등 온도 제어 시의 과도 성능을 크게 개선하였다.
- (3) 자연선택과 유전 법칙을 모방한 최적화 기법인 유전 알고리즘(GA)을 이용하여 최적 서보 제어기 설계의 핵심 파라미터인 평가함수의 하중 행렬을 반복적인 시행착오 과정 없이 설계 사양에 연동시

켜 설계하였다.

- (4) 최적 서보 제어기는 제어기 설계 시 설계 파라미터인 하중 행렬만을 선정하는 것으로 제어기를 쉽게 설계할 수 있다. 따라서, 향후 고성능 고효율 제어를 위한 제어 변수 확장이 필요한 다변수 VSRS 제어기 설계법으로써 유용할 것으로 기대된다.



참고문헌

1. Qureshi, T. Q., and Tassou, S. A., 1996, Variable-speed capacity control in refrigeration systems. In *Applied Thermal Engineering*, Vol. 16, No. 2, pp. 103-113.
2. Wu, C., Xingxi, Z., and Shiming, D., 2005, Development of control method and dynamic model for multi-evaporator air conditioners (MEAC). *Energy Conversion and Management*, Vol. 46, No. 3, pp. 451-465.
3. Zhao, D., Zhang, X., and Zhong, M., 2015, Variable evaporating temperature control strategy for VRV system under part load conditions in cooling mode. *Energy and Buildings*, Vol. 91, pp. 180-186.
4. Zhu, Y., Jin, X., Fang, X., and Du, Z., 2014, Optimal control of combined air conditioning system with variable refrigerant flow and variable air volume for energy saving. *International Journal of Refrigeration*, Vol. 42, pp. 14-25.
5. Yang, Y. Bin, Wu, M. Der, and Chang, Y. C., 2014, Temperature control of the four-zone split inverter air conditioners using LMI expression based on LQR for mixed H_2/H_∞ . *Applied Energy*, Vol. 113, pp. 912-923.
6. Yang, S. W., and Jeong, S. K., 2021, Robust Temperature Controller Design Based on a Sliding Mode with Optimal Switching Hyper-plane for a Variable Speed Refrigeration System. *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 33, No. 3, pp. 101-112.
7. Karunakaran, R., Iniyan, S., and Goic, R., 2010, Energy efficient fuzzy based combined variable refrigerant volume and variable air volume air conditioning system for buildings, *Applied Energy*, Vol. 87, No. 4, pp. 1158-1175.
8. Shao, S., Shi, W., Li, X., and Chen, H., 2004, Performance representation of variable-speed compressor for inverter air conditioners based on experimental data, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 27, No. 8, pp. 805-815.
9. Cao, J. P., Jeong, S. K., and Jung, Y. M., 2014, Fuzzy logic controller

- design with unevenly-distributed membership function for high performance chamber cooling system, *Journal of Central South University*, Vol. 21, No. 7, pp. 2684-2692.
10. Li, H., Jeong, S. K., Yoon, J. I., and You, S. S., 2008, An empirical model for independent control of variable speed refrigeration system, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 28, No. 14-15, pp. 1918-1924.
 11. Li, H., Jeong, S. K., and You, S. S., 2009, Feedforward control of capacity and superheat for a variable speed refrigeration system, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, No. 5-6, p. 1067-1074.
 12. Goyal, A., Staedter, M. A., and Garimella, S., 2019, A review of control methodologies for vapor compression and absorption heat pumps, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 97, pp. 1-20.
 13. Byun, J. Y., and Jeong, S. K., 2010, Design of PI and Feedforward Controller for Precise Temperature Control of Oil Cooler System, *Journal of Power System Engineering*, Vol. 14, No. 6, pp. 89-95.
 14. Kwon, T. E., Jeong, T. Y., and Jeong, S. K., 2016, Optimization of a PI Controller Design for an Oil Cooler System with a Variable Rotating Speed Compressor, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 28 No. 12, pp. 502-508.
 15. Kim, J. G., Han, C. H., and Jeong, S. K., 2020, Disturbance observer-based robust control against model uncertainty and disturbance for a variable speed refrigeration system, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 116, pp. 49-58.
 16. Lee, D.-B., Jeong, S.-K., and Jung, Y.-M., 2014, State Equation Modeling and the Optimum Control of a Variable-Speed Refrigeration System, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 26, No. 12, pp. 579-587.
 17. Jeong, S.-K., 2019, Optimum Robust Control for an Oil Cooler System with Variable Speed Drive of Machine Tools. *Journal of Power System Engineering*, Vol. 23, No. 3, pp. 18-26.
 18. Lin, J. L., and Yeh, T. J., 2007, Identification and control of multi-evaporator air-conditioning systems, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 30, No. 8, pp. 1374-1385.

19. Schurt, L. C., Hermes, C. J. L., and Neto, A. T., 2009, A model-driven multivariable controller for vapor compression refrigeration systems, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 32, No. 7, pp. 1672-1682.
20. Shah, R., Rasmussen, B. P., and Alleyne, A. G., 2004, Application of a multivariable adaptive control strategy to automotive air conditioning systems, *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, Vol. 18, No. 2, pp. 199-221.
21. He, X. D., Liu, S., Asada, H. H., and Itoh, H., 1998, Multivariable control of vapor compression systems, *HVAC and R Research*, Vol. 4, No. 3, pp. 205-230.
22. Schurt, L. C., Hermes, C. J. L., and Trofino Neto, A., 2010, Assessment of the controlling envelope of a model-based multivariable controller for vapor compression refrigeration systems, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 30, No. 13, pp. 1538-1546.
23. Jackson, S., Palazotto, A., Pachter, M., and Niedbalski, N., 2021, Evaporator disturbance rejection in vapor compression cycles with a linear quadratic regulator, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 35, No. 2, pp. 428-431.
24. Delatore, F., Novazzi, L. F., Leonardi, F., and Da Cruz, J. J., 2016, Multivariable optimal control of a heat exchanger network with bypasses, *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 33, No. 1, pp. 133-143.
25. Kim, N., Park, Y., Son, J. E., Shin, S., Min, B., Park, H., Kang, S., Hur, H., Ha, M. Y., and Lee, M. C., 2018, Robust Sliding Mode Control of a Vapor Compression Cycle, *International Journal of Control, Automation and Systems*, Vol. 16, No. 1, pp. 62-78.
26. Huang, Y., Khajepour, A., Ding, H., Bagheri, F., and Bahrami, M., 2017, An energy-saving set-point optimizer with a sliding mode controller for automotive air-conditioning/refrigeration systems, *Applied Energy*, Vol. 188, pp. 576-585.
27. Kim, D. G., and Jeong, S. K., 2021, H-infinity Controller Design for Robust Control of Variable Speed Refrigeration System with Disturbance and Model Uncertainty, *Korean Journal of Air-Conditioning and*

-
- Refrigeration Engineering, Vol. 33 No. 10, pp. 520-532.
28. Jeong, S. K., and Kwon, T. E., 2019, Robust Linear Quadratic Gaussian Controller Design for Oil Coolers Based on a State Space Model, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 31, No. 3, pp. 130-139.
 29. Shah, Rajat; Alleyne, Andrew G; Bullard, C. W., 2004, Dynamic Modeling and Control of Multi-Evaporator Air-Conditioning Systems, ASHRAE Transactions; Atlanta, Vol. 110, pp. 109-119.
 30. Smith, H. W., and Davison, E. J., 1972, Design of industrial regulators. Integral feedback and feedforward control, Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, Vol. 119, No. 8, pp. 1210.
 31. Takeda, T., and Kitamori, T., 1978, A Design Method of Linear Multi-Input-Output Optimal Tracking Systems, Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers, Vol. 14, No. 4, pp. 359-364.
 32. Whitley, D., 1994, A genetic algorithm tutorial, Statistics and Computing, Vol. 4, No. 2, pp. 65-85.
 33. Deep, K., Singh, K. P., Kansal, M. L., and Mohan, C., 2009, A real coded genetic algorithm for solving integer and mixed integer optimization problems, Applied Mathematics and Computation, Vol. 212, No. 2, pp. 505-518.
 34. Ohnishi, K., 1987, A new servo method in mechatronics, Transaction of Japanese Society of Electrical Engineering, Vol. 107-D, pp. 83-86.
 35. Umeno, T., and Hori, Y., 1991, Robust Speed Control of DC Servomotors Using Modern Two Degrees-of-Freedom Controller Design, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 38, No. 5, pp. 363-368.
 36. Choi, Y. et al., 2003, On the robustness and performance of disturbance observers for second-order systems, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 48, No. 2, pp. 315-320.
 37. Yang, S. W., 2021, Optimal Sliding Mode Controller Design for Robust Control of Variable Speed Refrigeration System, Master's Thesis, Pukyong National University, Korea.

Appendix

A.1 전달함수 모델로부터 상태 공간 모델로의 변환

본 절에서는 식(2.2)와 식(2.3)으로 표기된 압축기와 EEV의 1차계 전달 함수 모델을 상태 공간 모델로 변환하는 과정을 기술한다. 여기서 $U(s)$ 는 제어입력, $X(s)$ 는 입력, $Y(s)$ 는 출력을 각각 나타낸다. 따라서, 압축기와 EEV의 상태 공간 모델 변환 과정은 식(A.1.1), 식(A.1.2)와 같다.

1) Compressor

$$G_c = \frac{-0.43}{1680s+1} = \frac{X(s)}{U(s)}$$

$$sX(s) = -\frac{1}{1680}X(s) - \frac{0.43}{1680}U(s)$$

$$\mathcal{L}^{-1}[sX(s)] = \mathcal{L}^{-1}\left[-\frac{1}{1680}X(s) - \frac{0.43}{1680}U(s)\right]$$

이를 최적 서보 제어기 설계를 위한 상태 공간 모델로 변환하여 표현하면 $\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t)$, $y(t) = Cx(t)$ 의 형식인 식(A.1.1)와 같이 표현된다.

$$\therefore \begin{cases} \dot{x}(t) = -0.0006x(t) - 0.000256u(t) \\ y(t) = x(t) \end{cases} \quad (\text{A.1.1})$$

2) EEV

$$G_e = \frac{-0.045}{67s+1} = \frac{X(s)}{U(s)}$$

$$sX(s) = -\frac{1}{67}X(s) - \frac{0.045}{67}U(s)$$

$$\mathcal{L}^{-1}[sX(s)] = \mathcal{L}^{-1}\left[-\frac{1}{67}X(s) - \frac{0.045}{67}U(s)\right]$$

이를 최적 서보 제어기 설계를 위한 상태 공간 모델로 변환하여 표현하면 $\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t)$, $y(t) = Cx(t)$ 의 형식인 식(A.1.2)와 같이 표현된다. 이를 식(A.1.1)과 통합하여 나타내면 식(A.1.3)과 같이 표현된다.

$$\therefore \begin{cases} \dot{x}(t) = -0.0149x(t) - 0.000672u(t) \\ y(t) = x(t) \end{cases} \quad (\text{A.1.2})$$

$$\therefore \begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.0006 & 0 \\ 0 & -0.0149 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.000256 & 0 \\ 0 & -0.000672 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (\text{A.1.3})$$

A.2 MATLAB 최적화 툴(optimtool)의 ‘GA solver’



Fig. A.2.1 GA solver of optimization tool of MATLAB.

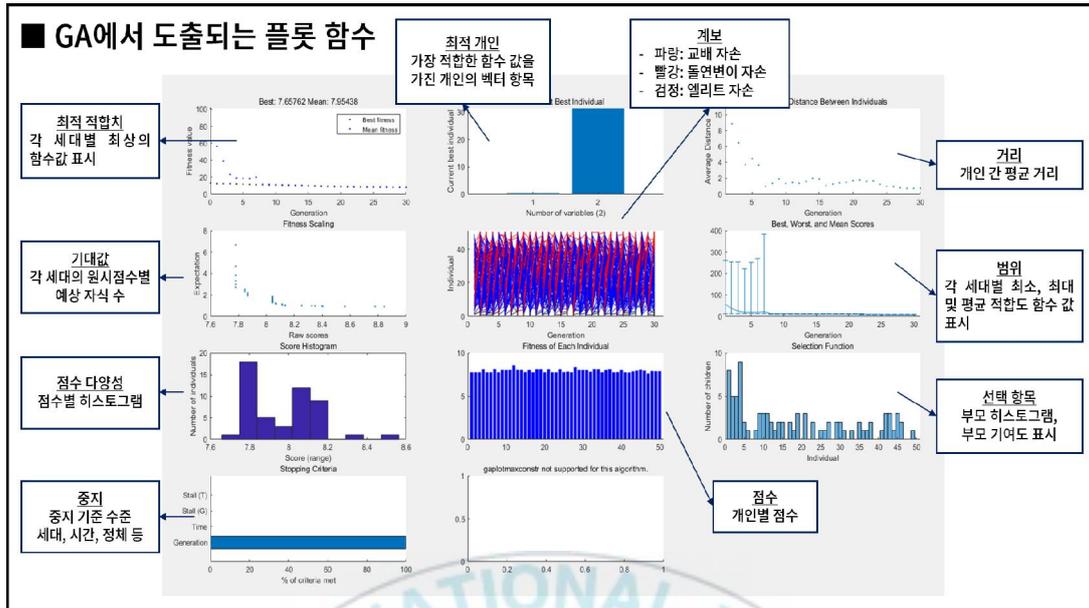


Fig. A.2.2 Plot functions of GA solver.

A.3 인버터 주파수 변동에 따른 과열도의 동특성

Fig. A.3.1은 선행연구자가 Table A.3.1의 실험 조건에서 진행한 인버터 주파수 변동에 따른 과열도의 동특성 실험 결과를 나타낸다. 이에 따라 간섭항 전달함수는 식(A.3.1)과 같이 모델링된다³⁷⁾.

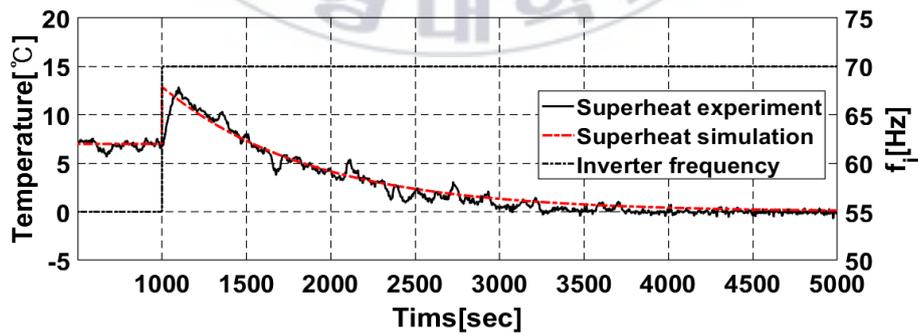


Fig. A.3.1 Experimental result for interference transfer function $G_{i1}(s)$.

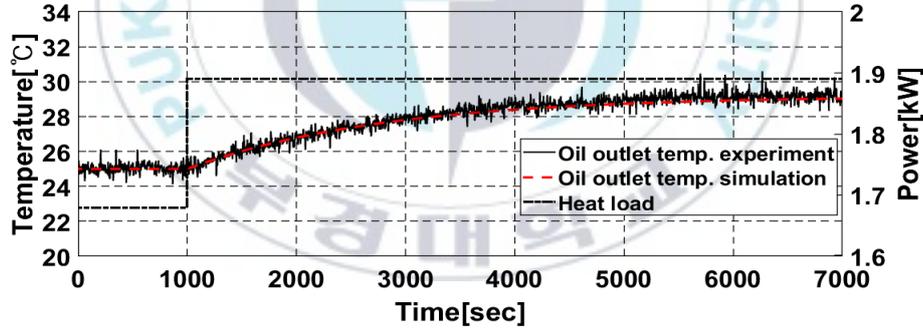
Table A.3.1 Experimental data of dynamic characteristic for $G_{i1}(s)$.

T_s [°C]	f_i [Hz]	Load [kW]	V_o [step]	T_a [°C]	\dot{m} [kg/h]	P_h [bar]	P_l [bar]
7→12.9→0	55→70	1.68	925	26.6	42.4	12.9	4

$$G_{i1}(s) = \left. \frac{\Delta T_s}{\Delta f_i} \right|_{V_o=c} = \frac{348.1 - 0.467}{885s + 1} \quad (\text{A.3.1})$$

A.4 열부하 변동에 따른 오일출구온도의 동특성

Fig. A.4.1은 선행연구자가 Table A.4.1의 실험 조건에서 진행한 열부하 변동에 따른 오일출구온도의 동특성 실험 결과를 나타낸다. 이를 통해 열부하 외란에 대한 오일출구온도의 거동을 시뮬레이션을 통해 정확히 파악할 수 있다. 열부하 전달함수는 식(A.4.1)로 모델링 된다³⁷⁾.

Fig. A.4.1 Experimental result for heat load transfer function $G_d(s)$.Table A.4.1 Experimental data of dynamic characteristic for $G_d(s)$.

T_o [°C]	Load [kW]	V_o [step]	F_i [Hz]	T_a [°C]	\dot{m} [kg/h]	P_h [bar]	P_l [bar]
25→29.18	1.68→1.89	950	55	27.4	45.2	13	4

$$G_d(s) = \left. \frac{\Delta T_o}{\Delta H} \right|_{f_i, V_o=c} = \frac{19.9}{1790s + 1} \quad (\text{A.4.1})$$

A.5 최적 서보 제어기 설계를 위한 MATLAB code

```

%% [최적 서보 제어기 설계 code]
clc; clear all; % 명령창 초기화
Ts = 1; % sampling time : 1s
%% VSRS의 전달함수 모델
tau1 = 1680;
dc1 = -0.43;
tau2 = 67;
dc2 = -0.045;
G_c= tf(dc1,[tau1 1]); % 압축기 전달함수
G_e = tf(dc2,[tau2 1]); % EEV 전달함수
G_i = tf([348.1 -0.467],[885 1]); % 인버터 주파수와 과열도 간의 간
접항
n=2; m=2; l=2; % 상태/입력/출력변수의 차원
%% VSRS의 상태 공간 모델(전달함수로 부터 변환)
A = [-1/tau1 0; 0 -1/tau2]; % 계수행렬
B = [dc1/tau1 0; 0 dc2/tau2];
C = [1 0; 0 1];
D = zeros(l,m);
%% VSRS의 확대계 상태 공간 모델
Aa = [A zeros(n,1); C zeros(1,1)]; % 확대계 (augmented) 계수행렬
Ba = [B;D];
Ca = [zeros(1,1) C];
%% 하중 행렬 Ra 선정을 통한 제어기 설계
Qa = Ca' * Ca; % 확대계 평가함수 Ja의 하중 행렬 Qa
Ra = [267.863 0; 0 11.6243]; % 최적 서보 제어기 설계의 핵심 파라미터
Ra 선정 (수동)
%% 설계된 제어기 게인
[Ka, Pa, E] = lqr(Aa, Ba, Qa, Ra); % lqr : 최적 제어기 설계 명령어
K1 = Ka(:,1:n); % 상태 피드백 게인 행렬 K1
K2 = Ka(:,n+1:n+1); % 서보 게인 행렬 K2
comp_LQR = K1(1,1); % 압축기의 상태 피드백 게인
comp_Servo = K2(1,1); % 압축기의 서보 게인

```

```
EEV_LQR = K1(2,2); % EEV의 상태 피드백 게인
EEV_Servo = K2(2,2); % EEV의 서보 게인
Anti_windup = comp_LQR/2; % 적분 누적 포화 방지용 Anti-windup 게인
```

A.6 GA를 이용한 최적 서보 제어기 설계를 위한 MATLAB code

```
%% [GA를 이용한 최적 서보 제어기 설계 MATLAB code (1st)]
%% GA의 제약조건 함수 파일 (목적함수 파일과 별도로 존재)
function [c,c_eq] = Constraints(k) % 함수 정의
assignin('base','k',k)
global ts PU J; % 전역변수로 지정
r11 = k(1); % 압축기 제어입력의 하중
r22 = k(2); % EEV 제어입력의 하중
%% 미지의 파라미터 하중행렬 Ra 정의
Ra = [r11 0; 0 r22]; % GA를 통한 최적화 대상 : 확대계 하중 행렬 Ra
%% VSRS의 전달함수 모델
tau1 = 1680;
dc1 = -0.43;
tau2 = 67;
dc2 = -0.045;
G_c = tf(dc1,[tau1 1]);
G_e = tf(dc2,[tau2 1]);
G_i = tf([348.1 -0.467],[885 1]);
n=2; m=2; l=2;
%% VSRS의 상태 공간 모델
A = [-1/tau1 0; 0 -1/tau2];
B = [dc1/tau1 0; 0 dc2/tau2];
C = [1 0; 0 1];
D = zeros(l,m);
%% VSRS의 확대계 상태 공간 모델
Aa = [A zeros(n,l); C zeros(l,l)];
Ba = [B;D];
Ca = [zeros(l,l) C];
%% 최적 서보 제어기 설계 code
```

```

Qa = Ca' * Ca;
[Ka, Pa, E] = lqr(Aa, Ba, Qa, Ra);
K1 = Ka(:,1:n);
K2 = Ka(:,n+1:n+1);
comp_LQR = K1(1,1);
comp_Servo = K2(1,1);
EEV_LQR = K1(2,2);
EEV_Servo = K2(2,2);
Anti_windup = comp_LQR/2;
%% MATLAB/Simulink 시뮬레이션으로 해당 파라미터 할당
assignin('base','comp_LQR',comp_LQR);
assignin('base','comp_Servo',comp_Servo);
assignin('base','EEV_LQR',EEV_LQR);
assignin('base','EEV_Servo',EEV_Servo);
assignin('base','Anti_windup',Anti_windup);
%% MATLAB/Simulink 시뮬레이션 결과의 응답 특성 수치 도출
ref = 25; % 목표값
sim('GA_simul'); % MATLAB/Simulink의 'simul_GA.slx' 시뮬링크 파일 실행 (최적 서보 제어 블록선도)
lsimresult = lsiminfo(oil_temp,t_sim,ref); % lsiminfo : 시뮬레이션 결과 정보 명령어
ts = lsimresult.SettlingTime; % ts: settling time(2%)
PU = 100*(ref - lsimresult.Min)/(lsimresult.Max-ref); % PU: percentage undershoot
assignin('base','ts',ts);
assignin('base','PO',PU);
J = ITAE(length(ITAE)); % J: objective function value, 시뮬링크 파일에서 'To workspace' 블록을 통해 변수 이름을 'ITAE'로 할당
%% GA의 비선형 제약조건 (설계사양 반영)
c(1) = ts - 1600; % 설계사양 ts < 1,600s
c(2) = 1590 - ts; % 1,590s < ts (설계사양을 뛰어넘는 값 방지)
c(3) = PU - 5; % 설계사양 PU < 5%
c_eq = [];
end

```

```

%% [GA를 이용한 최적 서보 제어기 설계 MATLAB code (2nd)]
%% GA의 목적함수 파일 (제약조건 함수 파일과 별도로 존재)
function y = ObjectiveFunction(k) % 함수 정의
global ts PU J
y = J % GA에서 최소화하고자 하는 목적함수 J(ITAE로 설정)의 값
end

```

A.7 DOB 설계를 위한 MATLAB code

```

%% [DOB 설계 방법(1) MATLAB code]
clc; clear all; % 명령창 초기화
Ts = 1; % sampling time : 1s
%% Q-필터 설계 : 이항(binomial) 필터 기본 꼴
syms i s % s = tf('s');
n = 0; % n : numerator order of Q
d = 3; % d : denominator order of Q
tau = 50; % tau : filter constant
%% 이항계수(binomial coefficient)
a_mi = factorial(d)/factorial(d-i)*factorial(i); % a_mi : 이항
계수, *식(4.7) 참고
%% 이항 Q-filter
numQ = symsum(a_mi*(tau*s)^i,i,0,n);
denQ = (tau*s+1)^d;
numQQ = sym2poly(numQ);
denQQ = sym2poly(denQ);
Q_filter = tf(numQQ,denQQ); % 이항 Q-필터, *식(4.6) 참고
P_n = tf(-0.43,[1680 1]); % 공칭 전달함수 모델
%% DOB 설계 : MATLAB/Simulink 파일 내부로, 설계된 Q-필터 파라미터 대입
qb_num = Q_filter.num; % qb : 이항(binomial) Q-필터, qb_num : qb
의 분자(numerator) 부분
qb_den = Q_filter.den; % qb_den : qb의 분모(denominator) 부분
qbn=qb_num{1, 1}; % 시뮬링크 내 Q-필터 전달함수 블록의 분자로 대입
qbd=qb_den{1, 1}; % 시뮬링크 내 Q-필터 전달함수 블록의 분모로 대입
gb=qb*inv(P_n); % 설계된 Q-필터와 역 공칭 전달함수의 곱

```

```

gb_num=gb.num;
gb_den=gb.den;
gbn=gb_num{1, 1};
gbd=gb_den{1, 1};

%% [DOB 설계 방법 (2) MATLAB code]
clc; clear all; % 명령창 초기화
Ts = 1; % sampling time : 1s
%% Q-필터 설계 : 이항(binomial) 필터에서 분자 차수 n = 0으로 고정한 꼴
s = tf('s');
P_n = tf(-0.43, [1680 1]); % 공칭 전달함수 모델
tau = 50 ; % 필터 시정수 선정
n = 3 ; % 상대차수(relative degree) 선정
Q_filter = 1/(tau*s+1)^n; % Q-필터 설계 (전달함수 꼴), *식(4.8) 참고
%% DOB 설계 : MATLAB/Simulink 파일 내부로, 설계된 Q-필터 파라미터 대입
qb_num = Q_filter.num; % qb : 이항(binomial) Q-필터, qb_num : qb
의 분자(numerator) 부분
qb_den = Q_filter.den; % qb_den : qb의 분모(denominator) 부분
qbn = qb_num{1, 1}; % 시뮬링크 내 Q-필터 전달함수 블록의 분자로 대입
qbd = qb_den{1, 1}; % 시뮬링크 내 Q-필터 전달함수 블록의 분모로 대입
gb = Q_filter*inv(P_n); % 설계된 Q-필터와 역 공칭 전달함수의 곱
gb_num = gb.num;
gb_den = gb.den;
gbn = gb_num{1, 1};
gbd = gb_den{1, 1};

```

A.8 제어 성능 지표 도출을 위한 MATLAB code

```

%% [시뮬레이션 결과에서 응답 특성 지표 도출 MATLAB code]
clc; clear all; % 명령창 초기화
Ts = 1; % sampling time : 1s
%% 과도 응답 지표
ref_To = 25; % 오일출구온도 지령값
ref_Ts = 7; % 과열도 지령값

```

```
sim('simulink_file_name'); % 시뮬링크 '파일 이름' 실행
lsimresult_To = lsiminfo(oil_temp,t_sim,ref_To); % lsiminfo :
시뮬레이션 결과 정보 명령어
ts_To = lsimresult_To.SettlingTime; % ts: settling time(2%)
PU_To = 100*(ref_To - lsimresult_To.Min)/(lsimresult_To.Max-ref_To);
% PU: percentage undershoot
t1 = find(abs(oil_temp-29.5) < 0.01);
t2 = find(abs(oil_temp-25.5) < 0.01);
tr_To = t2(1) - t1(1); % 오일출구온도 상승시간
lsimresult_Ts = lsiminfo(superheat,t_sim,ref_Ts); % 과열도에 대
해 실행
ts_Ts = lsimresult_Ts.SettlingTime;
PU_Ts = 100*(ref_Ts - lsimresult_Ts.Min)/(lsimresult_Ts.Max-ref_Ts);
%% 명령창으로 과도 응답 지표 값 도출
result_simul = ["To 정착시간" ts_To; "To 언더슈트" PU_To; "To 상승
시간" tr_To; "-" 0; "Ts 정착시간" ts_Ts; "Ts 언더슈트" PU_Ts]
assignin('base','result_simul',result_simul)
```

학술지 게재 논문 및 학술대회 발표 논문 목록

[학술지 게재 논문 목록]

1. H. R. Oh and S. K. Jeong, 2021, Precise Temperature Control of Multi-Input Multi-Output Variable Speed Oil Cooler System Based on Optimal Servo Control Using Genetic Algorithm, Journal of Korean Air-Conditioning and Engineering, Vol. 33, No. 11, pp. 566-578.

[학술대회 발표 논문 목록]

1. S. W. Yang, H. R. Oh and S. K. Jeong, 2020, Optimal Robust Servo Control Based on a Sliding Mode for a Variable Speed Refrigeration System, SAREK of proceedings(summer).
2. H. R. Oh, S. W. Yang and S. K. Jeong, 2020, Optimal Robust Servo Control for a VSRS with Model Uncertainty and Disturbance, SAREK of proceedings(summer).
3. H. R. Oh and S. K. Jeong, 2021, Optimal Servo Controller Design for a Variable Speed Refrigeration System Using Genetic Algorithm, SAREK of proceedings(summer).

감사의 글

좋아하는 학교에서 어느덧 2년이란 시간이 훌쩍 지나 졸업을 앞두고 되었습니다. 이곳에서 너무나 많은 것들을 배우고 익혔으며 소중한 추억을 쌓았습니다. 연구실에 처음 출근했을 때의 어색했던 감정이 아직 생생한데, 즐거웠던 연구실 생활을 이제는 추억으로 남긴 채 막을 내리려 합니다.

긴 시간을 저와 함께해주신 많은 분이 계십니다. 열정적으로 학생들을 가르치시는 모습이 정말 멋있고, 항상 저희를 아끼며 진심 어린 조언을 해주시는 지도교수 정석권 교수님께 깊이 존경을 표합니다. 좋은 일에는 함께 웃으며 축하해주시고, 힘든 일에는 격려해주셔서 정말 든든했습니다. 저희를 자식처럼 아껴주시고 사랑해주셔서 정말 감사합니다. 그리고 4년간의 학사과정과 2년간의 석사과정에서 많은 가르침을 주신 냉동공조 공학과의 김종수 교수님, 최광환 교수님, 윤정인 교수님, 김은필 교수님, 손창효 교수님, 특히 저의 기나긴 여정의 결실인 학위논문을 심사해주신 금종수 교수님, 설성훈 교수님, 그리고 연구실에 아낌없이 지원해주신 정태영 기관장님께 감사드립니다. 교수님들의 가르침과 은혜 덕분에 훌륭한 냉동공조인으로 성장할 수 있었습니다.

제가 갓 들어온 연구실 새내기 시절, 우물쭈물하던 문제를 명쾌하게 도와준 준기 오빠, 학사 시절부터 저를 많이 챙겨준 마음씨 고운 상원이 오빠, 흘러넘치는 재치로 동생들을 잘 이끌어주었던 동근이 오빠, 항상 주변을 즐겁게 만들어주는 우리 마지막 실장 인아, 정말 믿음직스럽고 정이 많은 귀여운 지은이, 우리 연구실에 많은 도움을 주었던 수진선배,

착한 막내 민기까지 고민과 즐거움을 한 공간에서 함께한 사랑스럽고 자랑스러운 우리 AMCL 멤버들 덕분에 무척이나 행복했습니다. 그리고 학사 시절을 함께하면서 동기로서 많은 의지가 되었던 똑똑이 선근이와 산이, 장난기 많아 항상 재밌고 부지런한 친구 근민이, 긍정의 에너지로 항상 빛이 나는 따뜻한 동기 은민이, 대학교 신입생 때부터 지금까지 저를 격려해주시고 배려해주신 김대우 선생님, 따뜻한 응원으로 저를 지지해주고 도와주신 Stanley Cho 선배님, 대학원생들을 알뜰살뜰 아끼고 챙겨주신 김대한 조교님, 전은희 조교님, 채현욱 조교님 모두 감사드립니다.

끝으로 가장 가까운 곳에서 큰 힘이 되어주고 열심히 모습이 정말 멋있는 마음 따뜻한 성훈이, 누구보다 긴 시간을 함께하며 서로의 고민을 들어주었고 시험 기간의 대화가 정말 재밌었던 영혼의 단짝 지희, 서로의 꿈 같았던 추억을 함께했던 언제봐도 반가울 사랑방 식구들, 어제 본 것 같이 편안한 친구들 준근쌤 딸래미들, 가족처럼 정을 나누면서 오랜 시간 함께한 102호 친구들, 마지막으로 묵묵히 저를 챙겨주고 응원해준 사랑하는 우리 가족 모두에게 감사한 마음을 전합니다.

석사과정은 저 자신을 많이 되돌아보고, 저를 더 잘 알게 된 잊지 못할 시간이었습니다. 그간 쌓은 배움과 경험으로 최선을 향해 부지런히 나아가는 사람이 되겠습니다. 다시 한번 저를 응원해주시고 함께 해주신 모든 분께 감사를 표합니다.

2022년 1월 7일 오행림