



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](#)

공학석사 학위논문

열교환기의 유체온도 제어를 위한 피드포워드 제어기를 가진 PID 제어

A PID control with Feedforward Controller for Controlling
Fluid Temperature in Heat Exchanger



지도교수 소명옥

2017년 8월

한국해양대학교 대학원

기관공학과

최효성

본 논문을 최효성의 공학석사 학위논문으로 인준함.

위원장 오 세 준 (인)

위 원 오 진 석 (인)

위 원 소 명 옥 (인)



2017년 06월 18일

한국해양대학교 대학원

목 차

List of Tables	iii
List of Figures	iv
Abstract	vi
제 1 장 서 론	1
1.1 연구 배경 및 동향	1
1.2 연구 내용 및 구성	2
제 2 장 열교환기	3
2.1 열교환기의 개요	3
2.2 열교환기의 수학적 모델링	5
제 3 장 유전알고리즘	11
3.1 유전알고리즘의 특징과 구조	11
3.2 실수코딩	13
3.3 초기집단 생성	13
3.4 유전연산자	14
3.5 적합도 평가	16
3.6 적합도 스케일링	17
3.7 엘리트 전략	17
3.8 종료 조건	17

제 4 장 PID 제어기	18
4.1 PID 제어기의 구성과 특징	18
4.2 PID 제어기의 동조	20
제 5 장 피드포워드 제어기가 결합된 PID 제어기	30
5.1 피드포워드 제어기가 결합된 PID 제어기	31
5.2 피드포워드 제어기가 결합된 PID 제어기 동조	33
제 6 장 시뮬레이션 및 검토	36
6.1 PID 제어기의 목표값 추종 성능	36
6.2 PID 제어기의 외란제거 성능	38
6.3 피드포워드 제어기를 결합한 PID 제어기의 성능	40
6.4 피드포워드 제어기 유무에 따른 PID 제어기의 외란제거 성능	42
제 7 장 결 론	43
참고문헌	44
감사의 글	46

List of Tables

Table 2.1	Parameters of heat exchanger system	10
Table 4.1	Tuned parameters for PID controller by Z-N	22
Table 5.1	Parameters of RCGA	34
Table 6.1	Parameters of the PID controller tuned by each technique	36
Table 6.2	Performances for each technique	37
Table 6.3	Disturbance rejection performance for each technique	39
Table 6.4	Disturbance rejection performance of PID controller combined with feedforward controller	41
Table 6.5	Disturbance rejection performances for PID controller and PID+FF controller	42

List of Figures

Figure. 2.1 Principle of heat exchanger	3
Figure. 2.2 Classification of heat exchanger	5
Figure. 2.3 Temperature control system for shell and tube heat exchanger	6
Figure. 2.4 Block diagram of the controlled object	9
Figure. 3.1 Operation of a RCGAs	12
Figure. 3.2 Modified simple crossover	15
Figure. 3.3 Dynamic mutation	15
Figure. 4.1 Step response and stability limit using simulink	21
Figure. 4.2 Closed loop control system of the IMC	23
Figure. 4.3 Block diagram of IMC	24
Figure. 4.4 Simple block diagram of IMC	24
Figure. 4.5 Search for parameters k , τ , L using Matlab	28
Figure. 4.6 Step responses of SOPTD model and FOPTD model	29
Figure. 5.1 Control system combined with feedforward controller	32
Figure. 5.2 Parameter optimization of PID controller using RCGA	34
Figure. 5.3 RCGA-based tuning for parameters of controller	35

Figure. 6.1	Step responses and control inputs for each technique ...	37
Figure. 6.2	Disturbance rejection performance for each technique	39
Figure. 6.3	Step responses and control inputs for each technique combined with feedforward controller	40
Figure. 6.4	Disturbance response and control input for each technique of PID controller combined with feedforward controller	41
Figure. 6.5	Responses of disturbance rejection for PID controller and PID+FF controller	42



열교환기의 유체온도 제어를 위한 피드포워드 제어기를 가진 PID 제어

최 효 성

한국해양대학교
기관공학과

초 록

열교환기는 고온의 유체와 저온의 유체가 전열 벽을 사이에 두고 고온에서 저온으로 열을 이동시키는 장치로 화학, 선박 등의 다양한 분야에서 사용되고 있다. 열교환기의 유체온도 제어의 경우 시간지연이 크거나 혹은 외란이 크게 작용할 경우 원하는 결과를 얻기 어렵다. 이 문제를 해결하기 위해 피드포워드(feedforward) 제어기를 PID 제어기에 결합시키는 방법을 생각할 수 있다.

본 논문에서는 열교환기의 온도제어를 위해 피드포워드 제어기를 결합한 PID 제어기를 설계한다. 피드포워드 제어기는 외란의 영향을 줄이기 위해 외란을 미리 측정하여 제어입력에 반영시킨다. 피드포워드 제어기와 PID 제어기의 파라미터는 최적화 기법의 하나인 RCGA로 동조한다. 이때 평가함수로 Integral Absolute Error를 사용한다. 전체 제어시스템의 목표값 추종 성능을 개선하기 위해 외란을 고정하고 목표값을 계단상으로 변경시키면서 PID 제어기의 파라미터들을 동조한다. 제안한 방법의 타당성을 확인하기 위해 기존의 동조법인 Z-N의 페루프 동조법, IMC 동조법과 시뮬레이션을 통해 비교 검토한다.

키워드 : 열교환기; PID 제어기; 피드포워드 제어기; RCGA

PID Control with Feedforward Controller for Controlling Fluid Temperature in a Heat Exchanger

Hyo-Sung Choi

Department of Mechatronics Engineering
Graduate School of Korea Maritime University

Abstract

A heat exchanger is a device that moves heat from a high temperature to a low temperature between the heat transfer wall, and is used in various fields such as chemicals and ships. In the fluid temperature control of a heat exchanger, it is difficult to obtain the desired result if the time delay is great or the disturbance is large. To solve this problem, a method of combining a feedforward controller with a PID controller can be thought. This paper proposed a method to control temperature of the heat exchanger by combining the feedforward controller with the PID controller. In order to reduce the influence of disturbances, a sensor measures the disturbance in advance and a feedforward controller reflects it in the control input. For the parameter tuning of the controller, RCGA, one of the optimization tools, was used. At this time, Integral Absolute Error was used as an evaluation function. The parameters of the PID controller were tuned while fixing the disturbance and changing the setpoint value stepwise to improve the setpoint tracking performance of the entire control system. In order to identify the validity of the proposed method, comparison and review were carried out through the closed loop tuning method of Z-N, IMC tuning method which are the existing tuning methods and the simulation.

KEY WORDS: heat exchanger; PID controller; feedforward controller; RCGA

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경 및 동향

산업화가 급격하게 이루어진 현대사회에서는 많은 프로세스들이 있고, 이를 다루기 위해 수많은 제어 방법이 연구되고 있다.

열교환기는 고온의 유체와 저온의 유체가 전열 벽을 사이에 두고 고온에서 저온으로 열을 이동시키는 장치로 화학, 선박, 빌딩의 난방 등 많은 분야에 폭넓게 사용되고 있다.

열교환기는 사용목적에 따라 분류하면 냉각기, 가열기, 응축기, 증발기 등이 있고, 구조에 따라 분류하면 다관식 열교환기, 이중관식 열교환기, 액막식 열교환기, 코일식 열교환기, 핀형 열교환기 등이 있다[1]. 산업현장에서 가장 많이 쓰이는 열교환기는 원통 다관식(shell and tube)이다. 열교환기는 비선형 및 시변 특성을 가지고 있기 때문에 정확한 수학적 모델링이 어렵고, 크기가 클수록 열 전달 시간지연이 크므로 정밀한 온도제어가 곤란하다. 지금까지 열교환기와 관련된 연구를 살펴보면 Vinaya 등은 이산형 모델예측제어(model predictive control) 알고리즘[2]을, Pandey 등은 PI형 퍼지제어[3]를, Sivakumar 등은 뉴로퍼지와 PID 제어를 결합[4]하는 방법을, Ahmad 등은 하이브리드 기준모델적용 퍼지제어[5]를, Padhee는 내부모델에 기초한 PID 제어기[6]를 제안하였다.

본 논문에서 다루는 내용은 열교환기에 대해 다른 제어기보다 비교적 설계와 동조가 쉬우면서 동시에 뛰어난 제어성능을 보여주는 온도제어를 위한 PID 제어기 설계기법이다. 비록 PID 제어는 고전적 방법이지만 역사가 깊은 만큼 많은 연구가 있어 왔고 현장에서도 널리 사용된다.

열교환기의 유체온도 제어의 경우 시간지연이 크거나 혹은 외란이 크게 작용

할 경우 원하는 결과를 얻기 어렵다. 이 문제를 해결하기 위해 피드포워드(feedforward) 제어를 PID 제어기에 결합시키는 방법을 생각할 수 있다. 피드포워드 제어기는 구성이 간단하고 설계에 대한 어려움이 적은 장점이 있지만 제어대상과 외란에 대한 정보를 정확하게 알아야 하며 오버슈트, 상승시간, 정착시간 등 실제 제어환경을 고려해야 하는 단점도 가지고 있다.

1.2 연구 내용 및 구성

본 논문에서는 열교환기의 온도제어를 위해 피드포워드 제어를 결합한 PID 제어를 설계한다[7]. 피드포워드 제어기는 외란의 영향을 줄이기 위해 외란을 미리 측정하여 제어입력에 반영시키는 역할을 한다.

PID 제어기의 파라미터 동조법으로는 Z-N(Ziegler-Nichols)의 페루프 동조법 및 개루프 동조법, IMC(Internal Model Control) 동조법, RCGA(Real Coded Genetic Algorithm) 동조법 등이 사용된다[8]. 이 중에서 RCGA는 주어진 조건에서 평가함수를 이용해 최적의 해를 탐색하는 최신 기법으로 본 논문에서도 이를 이용하여 제어기의 파라미터를 동조한다. 전체 제어시스템의 목표값 추종 성능을 개선하기 위해 외란을 고정하고 목표값을 계단상으로 변경시키면서 PID 제어기의 파라미터들을 RCGA를 이용하여 동조한다. 그리고 제안한 방법의 타당성을 확인하기 위해 기존의 동조법인 Z-N의 페루프 동조법, IMC 동조법과 시뮬레이션을 통해 비교 검토한다.

총 8장으로 구성된 본 논문은 2장에서 열교환기의 개요 및 수학적 모델링에 대해 설명하고, 3장에서는 본 논문에서 제안하는 최적화도구 중 한 가지 기법인 RCGA에 대해서 알아본다. 4장에서는 PID 제어기의 구성과 특징, PID 제어기의 페루프 동조법과 IMC 동조법을 설명하고, 5장에서는 피드포워드 제어가 결합된 PID 제어를 설계하며, 6장에서는 제안하는 RCGA 기반 PID 제어를 이용하여 시뮬레이션을 실시하고, 기존의 Z-N 동조법, IMC 동조법과 비교하여 그 유효성을 검증한다. 마지막으로 7장에서는 시뮬레이션을 통해 도출된 결과를 바탕으로 최종적인 결론을 요약한다.

제 2 장 열교환기

2.1 열교환기의 개요

열교환기는 두 유체를 서로 혼합하지 않고 개별적으로 열을 전달하는 장치로 오늘날 석유, 식품, 화학, 원자력 등 다양한 산업분야에 이용되고 있다. Figure 2.1 은 고온의 스팀을 이용하여 유입되는 저온의 물의 온도를 제어하는 열교환기의 기본개념을 간단히 나타낸 것이다.

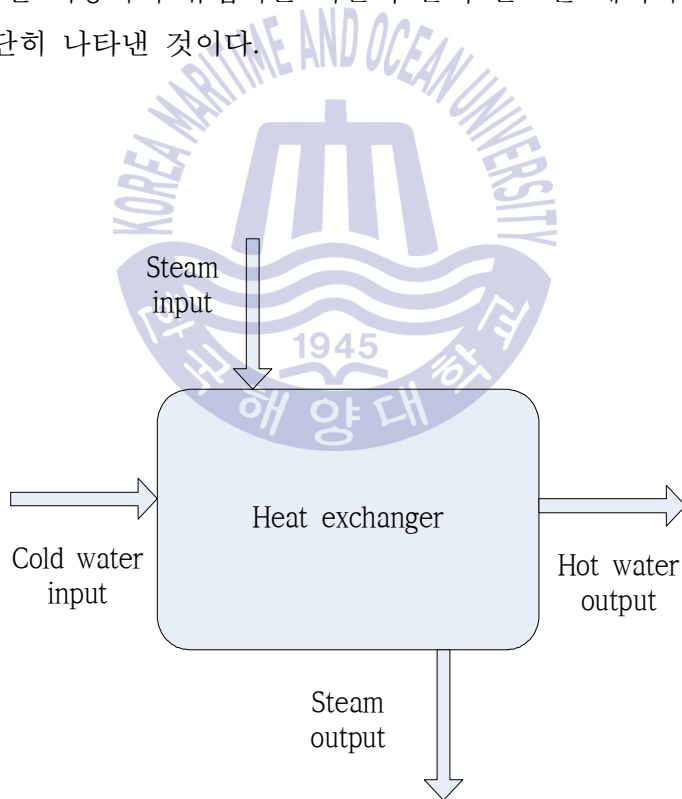


Figure 2.1 Principle of heat exchanger

온도의 차이에 의해서 고온에서 저온으로 열이 이동하는 현상을 전열 (heat transmission)이라고 하며 전도(conduction), 대류(convection), 복사(radiation)로 구분할 수 있다. 전도는 물질의 이동 없이 물질 내를 열이나 전기가 이동하는 현상이고, 대류는 유체 내 온도 차이 및 유체에 작용하는 외력에 의한 압력 차의 두 원인에 의해 생기는 유체의 유동이며, 복사는 전자기파에 의해 열이 매질을 통하지 않고 고온에서 저온의 물체로 직접 전달되는 현상이다[9].

열교환기를 사용목적에 따라 분류하면 고온측 유체의 냉각을 목적으로 하는 냉각기, 저온측 유체의 가열을 목적으로 하는 가열기, 증기의 응축을 목적으로 하는 응축기, 저온측 유체의 증발을 목적으로 하는 증발기 등이 있다. 구조에 따라 분류하면 금속관을 다수 늘어놓아 관외와 관내(관측)에 흐르는 두 유체 사이에서 열교환을 하는 다관식 열교환기, 2중관의 내관과 내관 및 외관 사이 고리 부분에 흐르는 온도가 다른 두 유체 사이에서 열교환을 하는 이중관식 열교환기, 직렬로 연결한 몇 단의 수평 관군의 상부에서 찬 물을 부어 관 표면을 박막상으로 흘러 떨어지는 냉각수에 의해 관내 유체를 냉각하는 액막식 열교환기, 통 안의 액을 가열 또는 냉각하는 경우 통 안에 담근 코일 관에 의해 열교환을 하는 코일식 열교환기, 몇 개의 관을 다발로 하여 전체를 금속관의 핀으로 밀착시키고, 몇 개의 관에 고온 유체를, 또 이것에 가까운 몇 개의 관에 저온 유체를 흘려 핀 부분에 흐르는 열에 의해 양 유체 사이에 열전달을 하게 하는 핀형 열교환기 등이 있다[10].

이와 같이 열교환기에는 다양한 종류가 있는데 산업현장에서는 약 60% 이상이 원통다관식 열교환기(shell and tube heat exchanger)를 사용하고 있다. 원통다관식 열교환기는 많은 전열관을 지니고 관벽을 통하여 동체측과 관내 유체간에 열교환을 한다. 동체와 덮개 판에 의해서 대기와 절연된 동체측 유체는 입구부터 출구까지 차단판으로 이동되고, 그 중 전열관과 만나 열교환을 하는 형태이다.

Figure 2.2는 다양한 종류의 열교환기를 나열해 놓은 것이다.

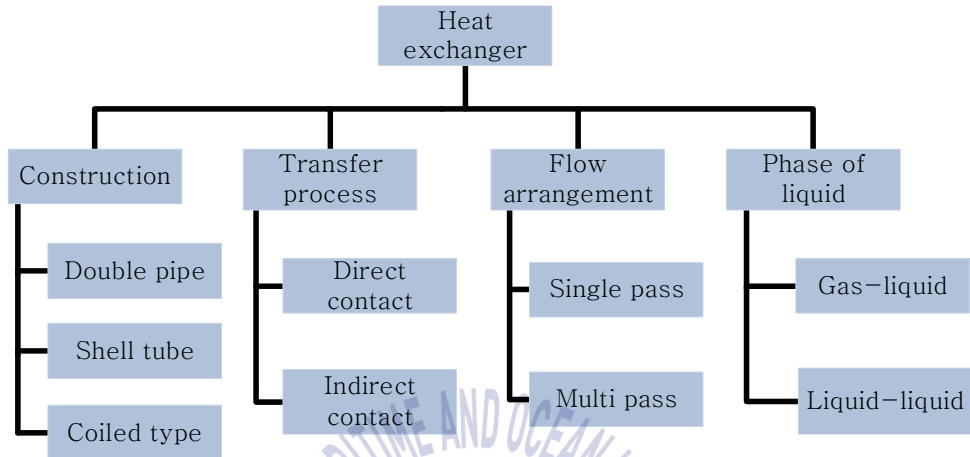


Figure 2.2 Classification of heat exchanger

2.2 열교환기의 수학적 모델링

열교환기의 동역학은 전열면적, 유체의 속도, 유동 패턴과 같은 여러 가지 요소에 달려있다. Figure 2.3은 가장 많이 이용되고 있는 원통다관식 열교환기의 온도제어시스템의 구조이다. 이 시스템은 열교환기, 제어기, 전류/공압 변환기(I/P converter), 제어밸브, 온도 전송기(TT; Temperature Transmitter) 등으로 이루어져 있다.

동작원리를 살펴보면 먼저 보일러(boiler)로부터 공급된 180[°C]의 과열증기는 제어밸브에 의해 증기량이 조절된 후 튜브들 속으로 흐른다. 반면 30[°C]의 유체는 원심펌프에 의해 shell을 통해 흐른다. 유체를 가열한 후 응축된 증기는 열교환기를 빠져나간다. 센서에서 계측된 유체의 입·출구 온도는 4~20[mA]의 전류신호로 변환되어 제어기의 입력으로 들어간다. 제어기에서는 이들의 계측값과 사용자의 설정 값을 비교해서 제어신호를 생성하고, 이 신호는 전류/공압 변환기를 거쳐 0.2~1.0[bar]의 공기압으로 변환되어 밸브를 제어하여 온도를 조절하게 된다.

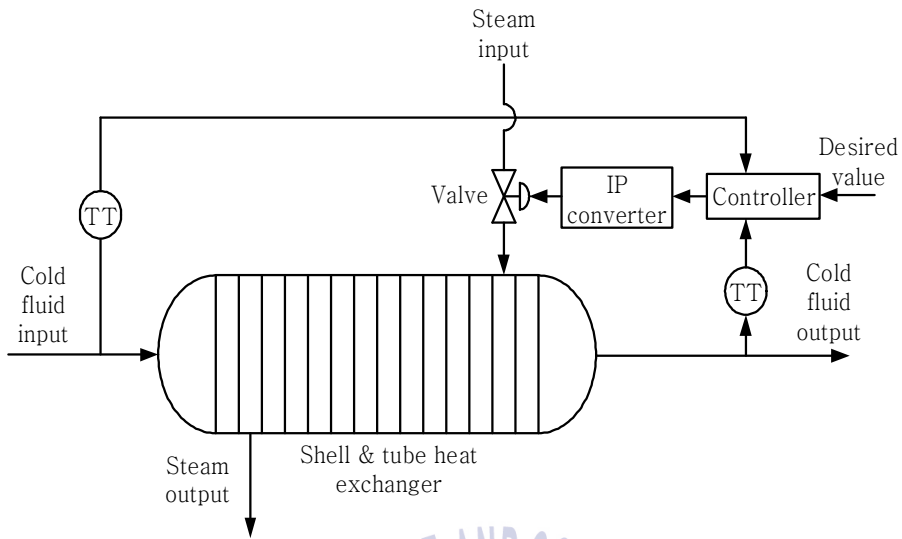


Figure 2.3 Temperature control system for shell and tube heat exchanger

2.2.1 포화기

실제 조작기의 동작에는 물리적 한계가 존재한다. 따라서 보다 현실적인 문제로 접근하기 위해 임의로 포화기(saturator)를 만들어 식 (2.1)과 같이 표현한다.

$$u_{\text{sat}} = \begin{cases} u_m, & u < u_m \\ u, & u_m \leq u \leq u_M \\ u_M, & u > u_M \end{cases} \quad (2.1)$$

여기서 u 는 제어기의 출력, u_M 은 제어기의 최대 출력, u_m 은 제어기의 최소 출력, u_{sat} 는 포화기를 거친 제어기의 출력이다. 제어기 출력 u 의 값이 u_M 을 초과하면 제어기의 출력을 u_M 으로 유지하고, 제어기 출력 u 의 값이 u_m 미만이면 제어기의 출력을 u_m 으로 유지하며, 제어기의 출력 u 의 값이 u_m 보다 크고 u_M 보다 작으면 u 값을 그대로 제어기의 출력으로 한다.

2.2.2 조작기

조작기(actuator)란 전기, 유압, 공기압 등을 이용하여 입력된 신호에 대해 알맞은 작동을 수행하는 장치이다. 조작기는 전기신호를 공기압 신호로 바꿔주는 전류/공압 변환기, 그리고 제어밸브로 구성되어 있고 그 전달함수는 아래와 같이 1차 시스템으로 나타낼 수 있다.

$$G_a(s) = \frac{U_a(s)}{U_{sat}(s)} = \frac{k_a}{1 + \tau_a s} = \frac{k_{IP}k_v}{1 + \tau_a s} \quad (2.2)$$

여기서 U_{sat} 은 포화기의 출력이고, U_a 는 조작기의 출력이다. k_a 는 조작기의 이득으로 밸브의 이득 k_v 와 전류/공압 변환기의 이득 k_{IP} 의 곱으로 되어있다. τ_a 는 조작기의 시정수이다.

2.2.3 열교환기

일반적으로 에너지평형을 생각한 이상적인 열교환기는 식 (2.3)과 같이 표현된다[11].

$$\eta(N, c) = \frac{1 - e^{-N(1-c)}}{1 - ce^{-N(1-c)}} \quad (2.3)$$

여기서 η 는 열교환기의 효율이고, N 은 Kays-London이 소개한 무차원 파라미터를 기반으로 두 개의 열적 질량 흐름 용량의 최소화 측면에서 정의한 값이고, c 는 시간당 열용량비를 나타낸다.

이러한 무차원적 모델링이 되는 반면, 조작기의 출력으로부터 열교환기의 출구 온도까지의 전달함수는 식 (2.4)처럼 시간지연이 있는 1차 시스템으로 나타낼 수 있다[12].

$$G_x(s) = \frac{k_x}{1 + \tau_x s} e^{-Ls} \quad (2.4)$$

여기서 k_x 는 열교환기의 이득이고 τ_x 는 열교환기의 시정수이며 L 은 시간지연을 나타낸다.

2.2.4 플랜트

조작기와 열교환기를 곱한 플랜트의 전달함수 $G_p(s)$ 는 다음과 같다.

$$G_p(s) = G_a(s)G_x(s) = \frac{k_a k_x e^{-Ls}}{(1 + \tau_a s)(1 + \tau_x s)} \quad (2.5)$$

2.2.5 센서

센서의 전달함수는 다음과 같이 1차 시스템으로 나타낼 수 있다.

$$G_s(s) = \frac{k_s}{1 + \tau_s s} \quad (2.6)$$

여기서 k_s 는 센서의 이득이고, τ_s 는 센서의 시정수이다.

2.2.6 외란

외란의 전달함수에 시간지연 항이 없다면 $G_d(s)$ 는 다음과 같이 1차 시스템으로 나타낼 수 있다.

$$G_d(s) = \frac{k_d}{1 + \tau_x s} \quad (2.7)$$

여기서 k_d 는 외란의 이득이고, τ_x 는 외란의 시정수로서 열교환기의 시정수와 같다.

Figure 2.4는 포화기, 조작기, 열교환기로 구성되어 있는 제어대상을 나타낸 것으로 외란입력이 부가되어있다.

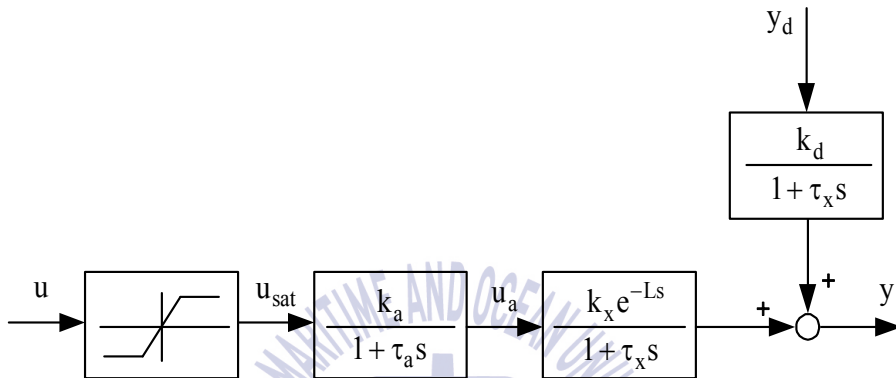


Figure 2.4 Block diagram of the controlled object

이것을 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$Y(s) = \frac{1}{1 + \tau_x s} [k_x e^{-Ls} U_a(s) + k_d Y_d(s)] \quad (2.8)$$

여기서 Y(s)는 유체의 출구온도이고, Y_d는 외란입력으로서 유체의 입구온도이다.

Table 2.1은 본 논문에서 사용할 각종 파라미터를 정리하여 나타낸 것이다. 이때 조작기의 최솟값과 최댓값은 각각 4[mA]와 20[mA]이다.

Table 2.1 Parameters of heat exchanger system

Parameters	Descriptions	Values
k_a	Gain of actuator	0.1
k_v	Gain of valve	2
k_{IP}	Gain of I/P converter	0.05
k_x	Gain of heat exchanger	50
k_d	Gain of disturbance	1
k_s	Gain of sensor	0.16
τ_a	Time constant of actuator	3
τ_x	Time constant of heat exchanger	30
τ_s	Time constant of sensor	10
L	Time delay of heat exchanger	1

제 3 장 유전알고리즘

이 단원에서는 열교환기의 온도제어를 위한 PID 제어를 설계하는데 필요한 최적화 도구로 이용되는 유전알고리즘에 대해 설명하고자 한다. 유전알고리즘은 전통적으로 이진코딩(binary coding)법을 사용해왔으나 염색체 길이가 커지는 경우 연산 부담이 되므로 특수한 경우에는 탐색이 이루어지지 않을 수 있다. 그러므로 본 논문에서는 이러한 단점을 없앤 실수코딩 유전알고리즘 RCGA(Real-Coded Genetic Algorithms)[13]에 대하여 설명하고자 한다.

3.1 유전알고리즘의 특징과 구조

유전알고리즘은 유전 메커니즘을 이용하여 컴퓨터 알고리즘으로 표현한 최적화(optimization) 기법이다. 최적화란 플랜트(plant)의 설계 또는 조작에서 연속적으로 그 각 부서의 프로세서를 합리적으로 결정하여 가장 적절한 값을 정하여 전체의 효율·성능·경제성 등을 최적화하는 것을 뜻한다. 1975년 J. H. Holland[14]에 의해 처음 개발된 이 유전 알고리즘은 후에 Goldberg[15]를 통하여 발전을 이루게 된다.

유전알고리즘의 기본적인 4가지 구조는 초기화, 적합도 평가 및 재생산, 교배, 돌연변이로 나눌 수 있다. 제일 먼저 초기화 단계에서는 우리가 구하고자 하는 값이 될 확률이 있는 요소들의 집합들이 만들어진다. 초기점들은 해 공간 내에 무작위로 분포되도록 선택 혹은 경험적인 방법으로 선택한다. 그 다음 부분인 적합도 평가에서는 우성인 집단은 선택이 되는 반면 열성인 집단은 소멸되게 된다. 여기서 적합도를 평가하기 위한 목적함수로는 IAE(Integral of the Absolute Error), ITAE(Integral of Times Absolute value of Error), ISE(Integral

of Squared Error)가 사용된다. 우성인 집단은 교배를 통하여 재결합을 하게 되고 각각 다른 유전자를 공유함으로써 새로운 개체를 생성하게 한다. 여기서 낮은 확률로 선택한 개체의 유전정보를 변경하여 새 정보를 집단에 집어넣는 수단을 돌연변이라고 한다. 이러한 과정으로 탄생한 새로운 세대의 집단은 다시 적합도 평가를 하게 되고 지역해(local solution)나 사점(dead corner)에서 벗어날 수 있게 한다. 이 과정을 가장 우수한 인자가 나올 때까지 계속 반복하게 된다. 소개한 RCGA는 함수의 최적화, 신호처리 등 다양한 분야에서 이용되고 있다.

Figure 3.1은 RCGA의 대략적인 탐색과정을 나타낸 것이다.

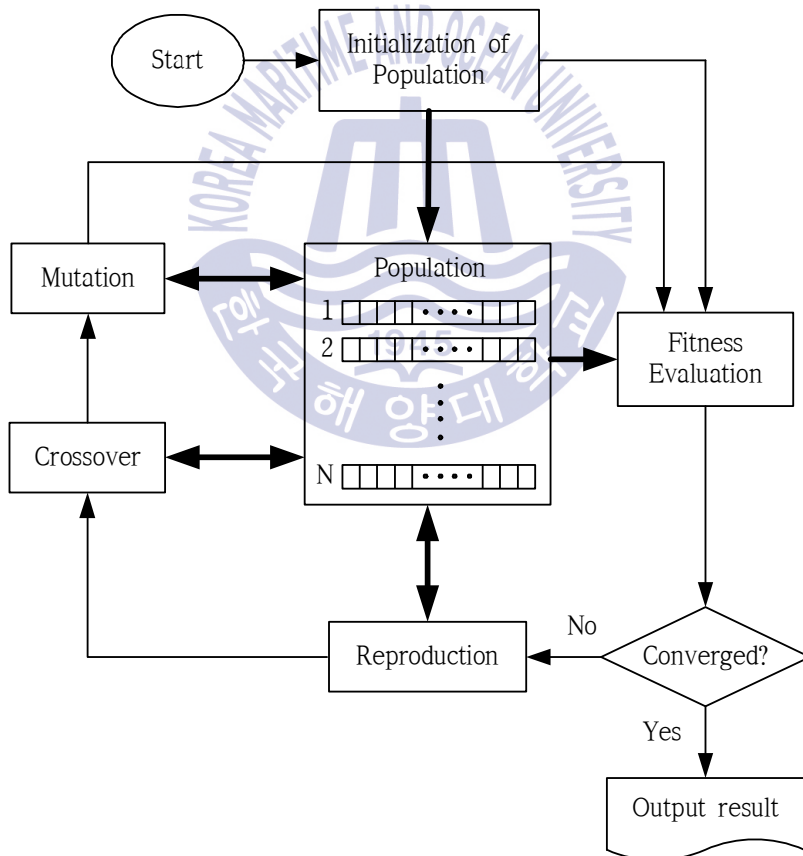


Figure 3.1 Operation of a RCGAs

3.2 실수코딩

앞서 언급했듯이 유전알고리즘은 이진코딩에 기초를 두고 있지만 탐색공간이 크고, 제약조건이 존재하여 아주 정밀한 해가 요구되는 경우는 염색체 길이를 크게 설정해야하므로 연산 부담으로 이어져 탐색이 되지 않는 경우가 생긴다. 이를 극복하기 위하여 본 논문에서는 이러한 단점을 보완한 RCGA를 사용한다.

먼저 실수코딩 염색체는 실수 값의 열로 나타낸다.

$$s = (s_1 \ s_2 \ \dots \ s_i \ \dots \ s_n) \quad (3.1)$$

여기서 n 은 벡터의 차원을 나타내고, i 번째 유전자를 $s_i \in \mathbb{R}$ 로 나타낼 수 있다. 이진코딩을 사용하지 않고 RCGA를 이용함으로써 염색체 길이는 벡터의 차원 n 과 일치하게 된다.

3.3 초기집단 생성

RCGA는 모의진화를 계속 진행하고, 나아갈수록 우수한 유전자를 지니게 된다.

$$P(k) = s_1(k), s_2(k) \dots s_i(k) \dots s_N(k) \quad (3.2)$$

위 식의 $P(k)$ 는 k 세대의 집단이고 N 개의 개체로 이루어져 있다. 집단의 크기 N 은 세대가 달라져도 변하지 않고 일정하다. $P(0)$ 는 초기집단으로 무작위 혹은 경험을 바탕으로 만들어진다. 이 논문에서는 전자의 방법인 무작위로 초기집단을 생성한다. 난수발생기를 이용해 무작위의 수를 발생시킬 정의영역은 아래와 같다.

$$x_{ij}^L \leq x_{ij}(k) \leq x_{ij}^U \quad (1 \leq i \leq N, 1 \leq j \leq n) \quad (3.3)$$

3.4 유전연산자

유전알고리즘은 유전연산자(genetic operator)를 사용하여 집단 내에서 모의진화를 일으켜 자연의 진화원리(재생산, 교배, 돌연변이) 알고리즘을 흉내 내는데 의미를 두고 있다.

3.4.1 재생산

재생산은 각 개체의 적합도를 기반으로 개체들을 선택하고 새로운 집단을 이루는 과정이다. 이 단계에서 열성 유전자는 사라지고 우성인 유전자만 선택되어 세대가 바뀔수록 우수한 개체만 가진 집단으로 형성되게 된다. 본 논문에서 재생산 연산자로 Pham과 Jin[16]이 제안한 구배와 유사한 재생산을 사용한다.

3.4.2 교배

이 논문에서 사용할 교배연산자인 수정단순교배[17]는 선택된 교배점 이후의 유전자를 서로 교환하여 자손을 형성하는 단순교배와 교배점의 유전자를 아래식과 같이 일차결합해서 자손을 만드는 산술적 교배를 결합한 형태다.

$$\begin{aligned}\tilde{x}_j^u &= \lambda x_j^v + (1-\lambda)\bar{x}_j^u \\ \tilde{x}_j^v &= \lambda x_j^u + (1-\lambda)\bar{x}_j^v \quad (1 \leq j \leq n)\end{aligned}\tag{3.4}$$

위 식의 \bar{x}_j^u 와 \bar{x}_j^v 는 집단에서 선택된 부모 염색체의 유전자, \tilde{x}_j^u 와 \tilde{x}_j^v 는 자손 염색체의 유전자이다. 곱인수 λ 는 고정이거나 혹은 0과 1사이의 난수로 각 유전자마다 독립적으로 결정된다.

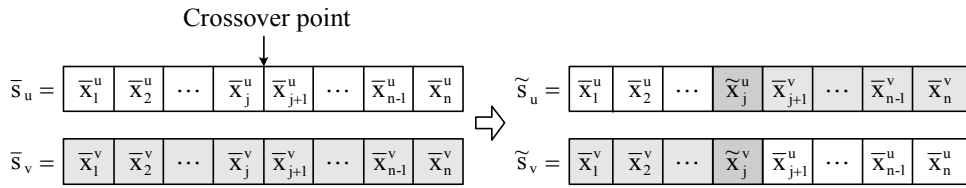


Figure 3.2 Modified simple crossover

3.4.3 돌연변이

이 진화단계에서는 모의진화가 이어지는 동안 재생산, 교배를 거쳐 우수한 집단만 남게 될 때 서로 닮아가서 사점에 빠지는 경우를 막을 수 있다. 돌연변이에는 균등 돌연변이, 경계 돌연변이, 동적 돌연변이 등이 있으며 본 논문에서는 동적 돌연변이를 이용한다. 동적 돌연변이 연산자는 세대 초기에 모든 탐색 공간을 같은 확률로 탐색한 후 세대수가 증가하면 탐색공간을 점점 좁혀 탐색하기 때문에 돌연변이 확률을 다른 돌연변이 연산자보다 크게 설정할 수 있다.



Figure 3.3 Dynamic mutation

$$x_j = \begin{cases} \tilde{x}_j + \Delta(k, \tilde{x}_j^{(U)} - \tilde{x}_j), & \text{if } \tau = 0 \\ \tilde{x}_j - \Delta(k, \tilde{x}_j - \tilde{x}_j^{(L)}), & \text{if } \tau = 1 \end{cases} \quad (3.5)$$

여기서 \tilde{x}_j 는 교배 연산을 거친 염색체 내에서 돌연변이 확률에 의해 선택된 j 번째 유전자이다. $\tilde{x}_j^{(L)}$ 는 j 번째 유전자의 하한값, $\tilde{x}_j^{(U)}$ 는 상한값이며 τ 는 0 또는 1의 난수이다. 이때 $\Delta(k, y)$ 는 다음 함수가 사용된다.

$$\Delta(k, y) = y \cdot r \cdot \left(1 - \frac{k}{T}\right)^b \quad (3.6)$$

식 (3.6)의 r 은 0과 1사이의 실수 난수이고, T 는 유전알고리즘의 최대 세대수이며, b 는 불균형 정도를 나타내는 매개변수이다.

3.5 적합도 평가

재생산, 교배, 돌연변이 연산을 통해 새로운 집단이 형성될 때마다 개체의 적합도는 목적함수에 의해 평가된다. 이 평가에서 적합도 함수는 음의 값을 가지지 않고 최대화 문제 형태로 표현되어야 한다. 식 (3.7~3.8)은 적합도 함수의 최대화 문제, 최소화 문제를 사상하여 나타낸 것이다.

최대화 문제

$$f(s(a)) = F(x(a)) - \gamma \quad (3.7)$$

최소화 문제

$$f(s(a)) = -F(x(a)) - \gamma \quad (3.8)$$

여기서 $f(s(a))$ 는 적합도 함수, $F(x(a))$ 는 목적함수이며, γ 는 $f(s) \geq 0$ 을 위한 보장 상수이며 세대는 a 로 표현했다. 탐색공간에서 목적함수 $F(x(a))$ 의 최소값을 찾는 것이 쉽지 않기 때문에 일반적으로 γ 값은 아주 작은 값으로 선정하지만 진화 중에 값이 고정된다면 선택압(selection pressure)이 떨어지는 문제가 발생하고 교배, 돌연변이 연산을 하면서 이뤄진 세대의 확보된 우성 개체가 제거될 수도 있다. 이러한 문제방지를 위해서 이용하는 것이 스케일링(scaling), 엘리트 전략(elitist strategy)이다[18].

3.6 적합도 스케일링

어느 세대의 집단 속에 아주 우월한 개체가 나타나게 된다면 재생산 연산자는 이 개체를 여러 개 복제하게 되고, 이로 인해 유전적인 다양성이 사라지게 된다. 따라서 초기세대에는 유전자의 다양성을 위하여 개체 간 상대적 적합도 영향을 줄이고, 후기에 크게 해 줄 필요가 있다. 이 역할을 해주는 것이 스케일링 윈도우 기법이다. 스케일링 윈도우 기법은 이전 집단의 개수인 스케일링 윈도우 W_s 를 이용하여 선택압을 유지하여 γ 값을 과거 여러 집단에서 발견되는 목적함수 값으로 계속적으로 바꿔주는 방법이다.

3.7 엘리트 전략

엘리트 전략은 어느 일정 한 세대에서 교배와 돌연변이 연산을 거치는 동안 최적 개체의 소멸을 막는 전략이다. 이전 세대의 최적 개체를 저장하고, 일련의 모의 진화를 시행한다. 만일 최적 개체가 파괴된 걸 확인하면 지금 세대의 가장 열성인 개체를 없애고 그 자리에 이전세대의 최적개체를 집어넣는다. 이 방법은 RCGA의 성능을 향상시키는 것으로 알려져 있다.

3.8 종료 조건

유전알고리즘은 어느 시점이 전역 해에 이르렀는지 알기 힘들다. 이는 유전 알고리즘 자체가 확률적인 탐색법이기 때문이다. 그러나 구체적인 적용에 있어서는 정해진 세대까지 모의진화 시키는 방식을 사용한다. 예로써 마지막 세대까지 진화한 개체가 불만족스럽다면 최종 세대수를 다시 늘려 모의진화를 시행한다. 이 논문 또한 위와 같은 방법의 종료 조건을 사용한다.

제 4 장 PID 제어기

4.1 PID 제어기의 구성과 특징

PID(Proportional Integral Derivative) 제어기는 비례·적분·미분 제어기로 구조가 비교적 간단하고 동조가 쉬우며 목표값 추종 및 외란제거 성능이 양호하기 때문에 산업현장에서 폭넓게 사용되고 있다. PID 제어기의 파라미터를 선정하는 작업을 동조(tuning)라 한다. 동조는 시스템의 수학적 해석 및 계산으로 이루어지지만 주변 환경 조건에 영향을 받기 때문에 좋지 못한 결과가 나올 수도 있다[19]. PID 제어기의 구성요소인 비례 제어기, 적분 제어기, 미분 제어기의 각각 동작특성을 설명한다.

4.1.1 비례 제어기

비례(P; Proportional) 제어기는 비례동작만을 가지는 제어기로 증폭도는 비례이득 또는 비례대(PB; Proportional Band)로 표시한다. 식 (4.1)은 비례 제어기의 출력이다.

$$u(t) = K_p e(t) \quad (4.1)$$

여기서 K_p 는 비례이득이고, $e(t)$ 는 목표값과 출력값의 오차이며, $u(t)$ 는 제어기의 출력이다. 즉, 비례 제어기의 출력은 오차를 K_p 만큼 증폭한 것이다. 비례이득 K_p 가 클수록 응답속도가 빠르게 되지만 너무 클 경우 시스템이 맥동현상을 일으키며 불안해진다. K_p 가 너무 작으면 정상상태편차(off-set)가 발생한다.

4.1.2 비례적분 제어기

적분(I; Integral) 제어기의 동작은 오차의 면적을 적분하는 것으로 조금이라도 오차가 있다면 시간이 흐를수록 오차의 면적은 점점 커지게 되므로 제어기 출력은 증가하게 된다. 이 제어기는 단독으로 사용하지 않고 비례 제어기와 함께 사용함으로써 비례 제어기만 사용할 때 발생하는 정상상태편차를 제거할 수 있다. 식 (4.2)는 위에서 말한 비례 제어기와 적분 제어기를 결합한 비례적분 (PI; Proportional Integral) 제어기를 나타낸 것이다.

$$u(t) = K_p [e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t)dt] = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int e(t)dt \quad (4.2)$$

여기서 T_i 는 적분시간 혹은 reset time이며 T_i 가 짧을수록 제어량이 목표치로 접근하는 시간이 줄어들게 된다. 하지만 T_i 가 너무 짧으면 끊임없이 진동하는 헌팅(hunting) 현상이 일어날 수 있으므로 헌팅 현상이 없어지는 가장 짧은 시간으로 맞추는 것이 중요하다.

4.1.3 비례미분 제어기

미분(D; Derivative) 제어기의 동작은 오차의 변화율을 증폭시켜 조작량을 추가 혹은 감소시키는 역할을 하여 응답속도를 향상시켜 시스템의 과도 응답특성을 개선시킨다. 식 (4.3)은 비례 제어기와 미분 제어기를 결합한 비례미분(PD; Proportional Derivative) 제어기를 표현한 것이다.

$$u(t) = K_p [e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt}] = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4.3)$$

여기서 T_d 는 미분시간이다.

4.1.4 비례적분미분 제어기

마지막으로 PID 제어기는 비례 제어기, 적분 제어기, 미분 제어기로 구성된다. 적분 제어기로 인하여 정상상태편차를 없애주어 정상상태 특성을 개선시킬 수 있고, 미분 제어기로 초과량을 감소시켜 응답특성을 개선시킬 수 있다. 즉 정상상태오차를 없애는 동시에 응답속도를 개선하는데 이용된다. 식 (4.4)는 기본적인 PID 제어기의 전달함수이다.

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (4.4)$$

여기서, K_p 는 비례이득, T_i 는 적분시간, T_d 는 미분시간을 나타내고 이는 식 (4.5)와 같이 이득으로 표현할 수 있다.

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (4.5)$$

여기서 K_i 는 $\frac{K_p}{T_i}$ 로 적분이득이고, K_d 는 $K_p T_d$ 로 미분이득이다. 이를 통해 PID 제어기의 출력 u 는 식 (4.6)으로 나타낼 수 있다.

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4.6)$$

4.2 PID 제어기의 동조

제어기 동조란 제어시스템이 사용자가 요구하는 성능을 구현하도록 외부환경에 알맞은 방법으로 제어기 파라미터들을 조정하는 것이다. PID 제어기는 비례이득 K_p , 적분시간 T_i 및 미분시간 T_d 의 3가지 파라미터를 적절히 잘 조절하여

야 한다. 고전적인 동조법에는 Z-N(Ziegler-Nichols), IMC(Internal Model Control), C-C(Cohen-Coon) 등이 있다.

4.2.1 Z-N의 페루프법에 의한 동조

Z-N(Ziegler-Nichols) 페루프법은 응답이 기본진동의 한 주기당 진폭 감쇠비가 25%가 되도록 제어기의 파라미터를 조절하는 방법으로 현장에서 많이 사용된다.

Z-N 기법을 이용한 PID 제어기의 동조과정은 다음과 같다[20].

- ① 비례 제어기만을 사용한다.
 - 적분동작이 최소가 되도록 T_i 값을 최대로 한다.
 - 미분동작이 최소가 되도록 T_d 값을 최소로 한다.
- ② 비례이득 K 의 값을 증가시키면서 출력이 **Figure 4.1**처럼 안정한계에 도달하면 이 K 값을 한계이득 K_u 로 하고 이때의 주기를 한계주기 T_u 로 한다.

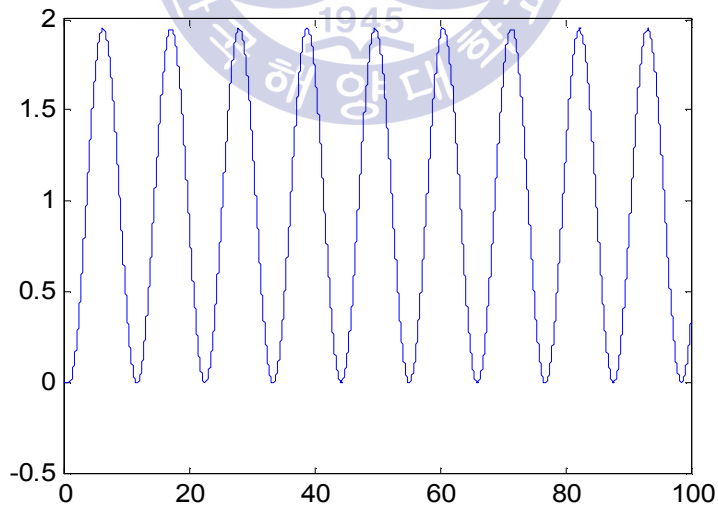


Figure 4.1 Step response and stability limit using simulink

③ Table 4.1을 이용하여 K_p , T_i , T_d 값을 구하여 동조한다.

Table 4.1 Tuned Parameters for PID controller by Z-N

Controllers	Parameters		
	K_p	T_i	T_d
P	$K_u/2$		
PI	$K_u/2.2$	$T_u/1.2$	
PID	$K_u/1.7$	$T_u/2$	$T_u/8$

시간지연이 없는 시스템의 경우에는 해석적으로 한계이득과 한계주기를 구할 수도 있다. 반면 시간지연이 있는 시스템의 경우에는 해석적으로 한계이득과 한계주기를 구하면 오차가 생긴다. 따라서 본 논문에서의 Z-N 기법은 Mathwork software의 simulink를 이용해 시행착오를 반복하여 파라미터를 구한다.

위에 설명했던 방법과 동일하게 제어기의 K_i , K_d 를 모두 0으로 한 후, 오직 K_p 값만을 작은 값부터 큰 값으로 변경하면서 계단상 입력을 가하였다. Figure 4.1 과 같이 안정한계에 도달할 때의 한계이득 K_u 는 16.5065이고, 이때의 한계주기 T_u 는 34.46이었다. 이 값들을 Table 4.1에 대입하여 K_p , T_i , T_d 를 계산한[20] 후 PID 제어기의 이득을 구하면 $K_p=9.879$, $K_i=0.574$, $K_d=42.579$ 이다.

4.2.2 IMC 기법을 이용한 동조

IMC(Internal Model Control) 기법은 프로세스의 완전한 모델을 얻을 수 있다는 가정 하에 제어기로 이것의 역을 취함으로써 이론적으로는 완벽한 제어가 가능하다는 개념이다.

먼저 페루프 제어기의 IMC 기법을 Figure 4.2를 통해 설명한다.

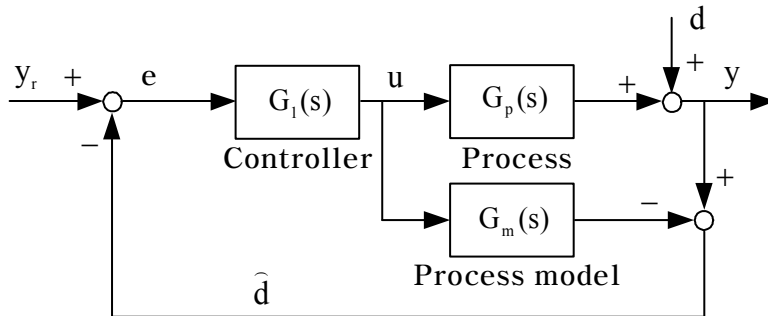


Figure 4.2 Closed loop control system of the IMC

플랜트와 모델간의 오차를 피드백하여 새로운 제어입력을 만드는 방법으로 Figure 4.2는 IMC 동조법을 위한 폐회로 제어시스템의 블록선도를 나타낸다. u 는 $G_p(s)$ 와 $G_m(s)$ 양쪽 모두에 입력되고, d 는 외란이다. Figure 4.2를 식 (4.7~4.10)로도 표현할 수 있다.

$$E(s) = Y_r(s) - \hat{D}(s) \quad (4.7)$$

$$U(s) = G_1(s)E(s) \quad (4.8)$$

$$\hat{D}(s) = Y(s) - G_m(s)U(s) \quad (4.9)$$

$$Y(s) = G_p(s)U(s) + D(s) \quad (4.10)$$

위 식들에서 $\hat{D}(s)$ 를 먼저 소거 후 $U(s)$ 를 식 (4.10)에 대입하면 식 (4.11)으로 나타낼 수 있다.

$$Y(s) = \frac{G_1(s)G_p(s)}{1+G_1(s)[G_p(s)-G_m(s)]}Y_r(s) + \frac{[1-G_1(s)G_m(s)]}{1+G_1(s)[G_p(s)-G_m(s)]}D(s) \quad (4.11)$$

만일 $G_m(s) = G_p(s)$ 이고 $G_1(s) = G_m^{-1}(s)$ 라면 외란이 존재하더라도 항상 출력 y 는 y_r 이 되는 제어가 가능하다. $G_m(s) \approx G_p(s)$ 가 될지라도 $G_1(s) = G_m^{-1}(s)$ 가 성립된다면 외란을 제거할 수 있다.

Figure 4.3은 Figure 4.2의 구조를 변경하여 표현한 것이다.

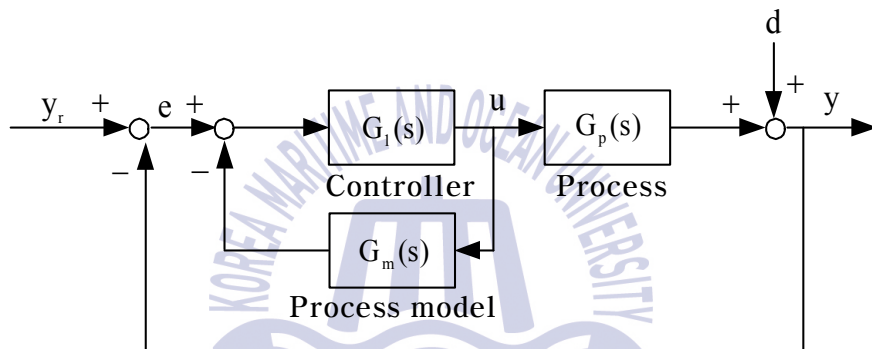


Figure 4.3 Block diagram of IMC

Figure 4.4는 Figure 4.3의 $G_1(s)$ 와 $G_m(s)$ 를 결합하여 간략히 표현한 것이다.

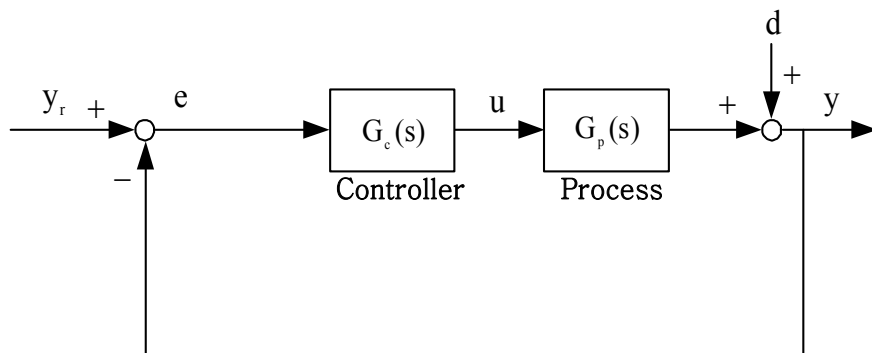


Figure 4.4 Simple block diagram of IMC

간략화된 블록선도의 제어기 부분인 $G_c(s)$ 는 다음과 같이 된다.

$$G_c(s) = \frac{G_1(s)}{1 - G_1(s)G_m(s)} \quad (4.12)$$

만약 프로세서 모델이 식 (4.13)와 같은 FOPTD(First Order Plus Time Delay) 시스템인 경우에 IMC는 다음과 같은 절차로 등가 변환되어 PID 제어기의 파라미터가 동조된다.

$$G_m(s) = \frac{ke^{-Ls}}{1 + \tau s} \quad (4.13)$$

여기서 k 는 프로세스 모델의 이득이고, τ 는 시정수이며 L 은 시간지연을 나타낸다. 시간지연을 나타내는 e^{-Ls} 는 Pade 근사법[21]을 이용하여 근사화하면 아래와 같이 된다.

$$e^{-Ls} \approx \frac{1 - \frac{1}{2}Ls}{1 + \frac{1}{2}Ls} \quad (4.14)$$

따라서 프로세스 모델은 식 (4.15)와 같다.

$$G_m(s) = \frac{k}{1 + \tau s} \frac{1 - \frac{1}{2}Ls}{1 + \frac{1}{2}Ls} \quad (4.15)$$

실제 IMC 제어기를 설계할 때 프로세스 모델 $G_m(s)$ 를 아래 식처럼 가역부분 $\tilde{G}_m(s)$ 와 영점 또는 시간지연 요소 등이 포함되는 비가역부분 $\hat{G}_m(s)$ 로 분리한다[8].

$$G_m(s) = \tilde{G}_m(s)\hat{G}_m(s) \quad (4.16)$$

식 (4.15)에서 가역부분 $\tilde{G}_m(s) = \frac{k}{(1+\tau s)(1+\frac{1}{2}Ls)}$ 이고,

비가역부분 $\hat{G}_m(s) = 1 - \frac{1}{2}Ls$ 이다. 그리고 IMC의 $G_1(s)$ 는 플랜트모델의 가역부분의 역에 식 (4.18)의 저주파 필터 $G_f(s)$ 를 곱하여 구한다.

$$G_1(s) = \tilde{G}_m^{-1}(s)G_f(s) \quad (4.17)$$

$$G_f(s) = \frac{1}{1+\tau_f} \quad (4.18)$$

여기서 필터의 시정수 τ_f 는 모델의 시정수 τ 의 $\frac{1}{10}$ 배로 한다.

따라서 IMC 제어기의 전달함수 식 (4.12)는 식 (4.19)로 표현된다.

$$G_c(s) = \frac{G_1(s)}{1 - G_1(s)G_m(s)} = \frac{\tilde{G}_m^{-1}(s)G_f(s)}{1 - \tilde{G}_m^{-1}(s)G_f(s)G_m(s)}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{(1 + \tau s)(1 + \frac{1}{2}Ls)}{k(\tau_f + \frac{1}{2}L)s} \\
&= \frac{(\tau + \frac{1}{2}L)}{k(\tau_f + \frac{1}{2}L)} \left[1 + \frac{1}{(\tau_f + \frac{1}{2}L)s} + \frac{\tau L}{2\tau + L}s \right] \tag{4.19}
\end{aligned}$$

식 (4.19)를 통하여 PID 제어기의 파라미터 K_p , T_i , T_d 를 구하면 식 (4.20)으로 표현된다.

$$K_p = \frac{\tau + \frac{1}{2}L}{k(\tau_f + \frac{1}{2}L)}, \quad T_i = \tau + \frac{1}{2}L, \quad T_d = \frac{\tau L}{2(\tau + \frac{1}{2}L)} \tag{4.20}$$

IMC 동조법은 목표값 추종 성능에 초점을 두기 때문에 프로세스의 시정수에 비하여 τ_f 가 아주 작아지면 외란제거 성능이 나빠질 수 있다.

작동기와 열교환기를 포함하고 있는 본 논문에서 다루는 플랜트의 전달함수 $G_p(s)$ 는 시간지연이 있는 2차 시스템(SOPTD)으로 이루어져 있다. IMC 기법을 이용하기 위해서는 이것을 시간지연이 있는 1차 시스템(FOPTD)으로 변환해야 한다. 본 논문에서는 Matlab software를 이용하여 SOPTD를 FOPTD로 변환했다.

Figure 4.5는 FOPTD의 k , τ , L 의 값을 RCGA를 이용하여 탐색하는 과정을 나타낸 것이다. 목적함수 J 가 최소로 될 때 $k=4.976$, $\tau=28.557$, $L=2.228$ 이다.

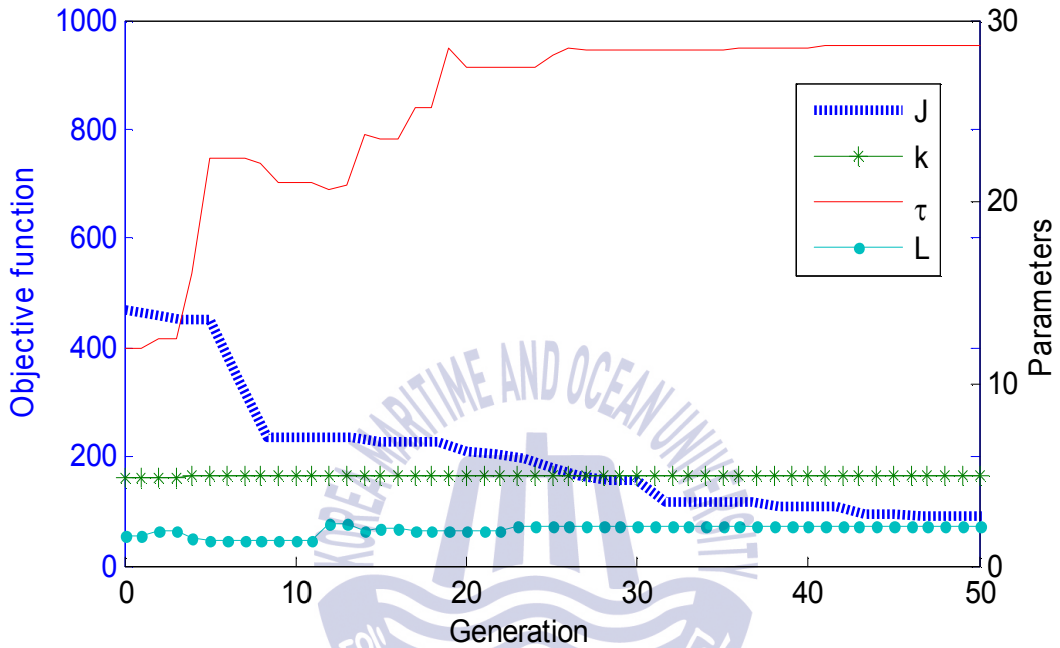


Figure 4.5 Search for parameters k , τ , L using Matlab

Figure 4.6은 SOPTD 플랜트의 모델과 이것을 1차식으로 근사화한 FOPTD 모델에 대한 계단응답을 나타낸 것이다. 여기서 점선은 SOPTD 모델에 대한 계단응답이고, 실선은 FOPTD 모델에 대한 계단응답이다. 두 응답을 비교해 보면 어느 정도 잘 근사화 되었다고 할 수 있다.

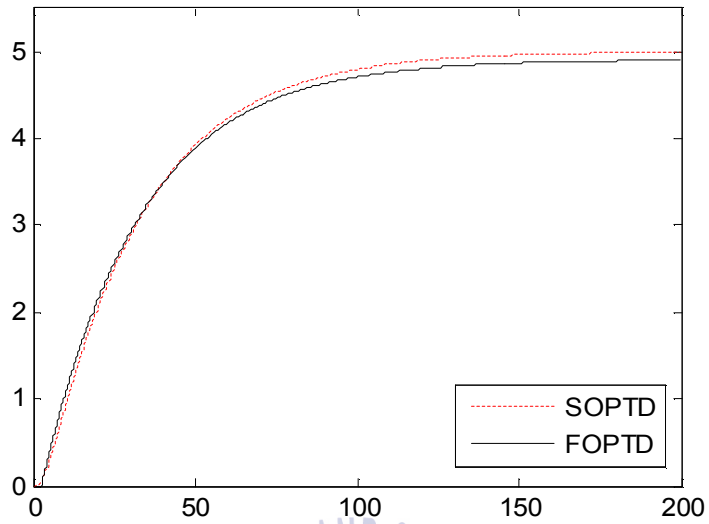


Figure 4.6 Step responses of SOPTD model and FOPTD model

이 값 k , τ , τ_f 및 L 을 식 (4.20)에 대입하여 K_p , T_i , T_d 를 계산한[8] 후 PID 제어기의 이득을 구하면 $K_p=1.502$, $K_i=0.051$, $K_d=1.610$ 이다.

제 5 장 피드포워드 제어기가 결합된 PID 제어기

앞서 살펴보았던 PID 제어기는 나름대로 좋은 성능을 지니고 있지만 아래와 같은 단점 또한 존재한다.

- 외란에 대한 보상을 위한 예측제어동작이 불가하다.
- 외란이 빈번하게 제어기에 영향을 미칠 경우 프로세스가 정상 값이 아닌 과도상태가 되어버린다.
- 시간지연이 있는 시스템인 경우 외란입력이 있더라도 시간지연 동안에는 목표값과 제어량 사이에 오차가 발생하지 않는다. 따라서 이 기간에는 외란에 대해 제어기의 기능을 하지 못한다[11].

위의 단점을 보완하기 위해 피드포워드 제어기가 사용될 수 있다. 열교환기와 제어밸브 간의 파이프의 길이가 길면 시간지연이 커지고 시간지연이 크면 온도제어가 어렵다. 또한 외란변화가 심한 경우에는 성능저하가 일어날 수도 있다. 이에 대한 대책으로 열교환기의 셸 측의 입구에 온도 센서를 사용하여 유체의 온도를 측정하고, 이 측정정보를 피드포워드 제어기에 주어 외란의 영향이 제어기에 미치기 전에 미리 제거하는 방법을 고려할 수 있다. 그러나 피드포워드 제어기는 외란을 온라인상으로 측정 또는 추정해야 하는 조건이 필요하므로 단독으로 사용하지 않고 피드백 제어기와 함께 적용한다.

5.1 피드포워드 제어기가 결합된 PID 제어기

기존의 PID 제어기는 내재적 한계로 목표값 추종 성능이 우수하면 외란제거 성능이 좋지 못하고 외란제거 성능이 우수하면 목표값 추종 성능이 우수하지 못하다. 두 성능을 동시에 우수하게 만들고자 적절한 평가함수를 넣어 동조시키면 어느 한 쪽의 관점에서 동조한 결과보다 성능이 떨어진다. 따라서 미리 두 조의 이득을 운전환경의 변화에 따라 스위칭을 이용하거나, 2자유도 방식의 PID 제어기를 사용하고 있다. 그러나 이 방법은 2종류의 파라미터가 들어감으로써 동조가 힘들게 된다. 열교환기 온도제어 시스템은 정지점에서 동작점까지 작동하거나 혹은 동작점에서 정지점까지 정지 시 수동모드로 전환되고 운전자가 목표값을 가감하면 제어기는 출력이 목표값을 따르도록 작동한다. 출력이 동작점 근처로 도달하여 자동모드로 전환되면 이때부터는 목표값은 고정되어 외란변화에 대해서만 그 영향이 억제되도록 제어기가 작동하게 된다.

앞에서 설명한 1자유도 PID 제어기도 내재적 한계를 극복할 수 없으므로 외란에 대한 영향을 줄이기 위해 본 논문에서는 동적모델에 기반한 피드포워드 제어기를 종래의 PID 제어기에 결합하여 제어기를 설계한다[11]. 피드포워드 제어기는 센서에 의해 미리 측정된 냉각유체의 입구온도를 입력으로 하여 출력을 계산한다. 따라서 전체 제어기의 출력은 이 피드포워드 제어기의 출력과 PID 제어기의 출력을 합산한 것이 된다.

Figure 5.1은 피드포워드 제어기가 결합된 전체 제어시스템을 나타낸 것이다.

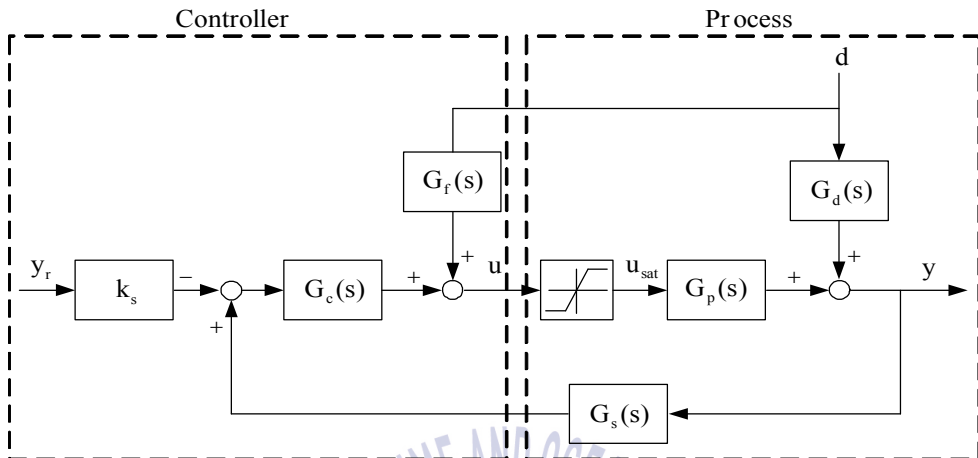


Figure 5.1 Control system combined with feedforward controller

이 시스템에서 외란 입력에 대한 출력의 페루프 전달함수는 다음과 같다.

$$\frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{G_f(s)G_p(s) + G_d(s)}{1 + G_c(s)G_p(s)G_s(s)} \quad (5.1)$$

외란 d부분에서 제어량 y에 이르는 두 경로 $G_f(s)G_p(s)$ 와 $G_d(s)$ 의 합, 즉 식 (5.1)의 분자가 0이 되면 외란을 제거할 수 있다.

$$G_f(s)G_p(s) + G_d(s) = 0 \quad (5.2)$$

위 식을 다시 쓰면 아래와 같다.

$$G_f(s) = -\frac{G_d(s)}{G_p(s)} \quad (5.3)$$

5.2 피드포워드 제어가 결합된 PID 제어기 동조

목표값과 외란을 동시에 바꾸면서 K_p , K_i , K_d 를 동조하지 않은 이유는 아래와 같다.

- 시스템은 수동 혹은 자동의 둘 중 하나로만 작동한다.
- 목표값과 외란을 동시에 변경하며 구한 값들은 어느 한 쪽의 관점에서 동조한 이득보다 성능이 낮다.

먼저 전체 제어시스템의 목표값 추종 성능을 개선하기 위해 외란을 고정하고 목표값을 계단상으로 변경시키면서 PID 제어기의 파라미터 K_p , K_i 및 K_d 를 동조한다. 이때 동조법은 최적화 기법의 하나인 RCGA를 이용하고, 평가함수로는 다음의 Integral Absolute Error(IAE)를 사용한다.

$$J(\phi) = \int_0^{t_f} |e(t)| dt \quad (5.4)$$

여기서 ϕ 는 $[K_p, K_i, K_d] \in \mathbb{R}^3$ 이고, $e(t)$ 는 목표값과 출력의 오차이며, 적분시간 t_f 는 이후 적분 값이 무시될 수 있을 정도로 충분히 큰 값이다.

일반적으로 최적화 기법들은 확률적 기반에서 작동하므로 구해지는 해는 초기 집단의 구성에 따라 약간의 차이가 발생한다. 그 이유는 최적화기법 자체의 한계성과 탐색된 해들을 평가하기 위한 목적함수를 계산할 때 생기는 수치적 오차 때문이다. 따라서 RCGA로 탐색한 해가 최적임을 보장하기 위하여 여러 가지 random seed 값으로 시뮬레이션을 실행하고, 그 결과의 평균값을 최적해로 한다. 보통 5회 이상 시행하여 평균값을 최적해로 한다.

Figure 5.2는 RCGA에 의해 평가함수 IAE를 최소화하도록 PID 제어기의 각 파라미터들을 탐색하는 개념을 나타낸 것이다.

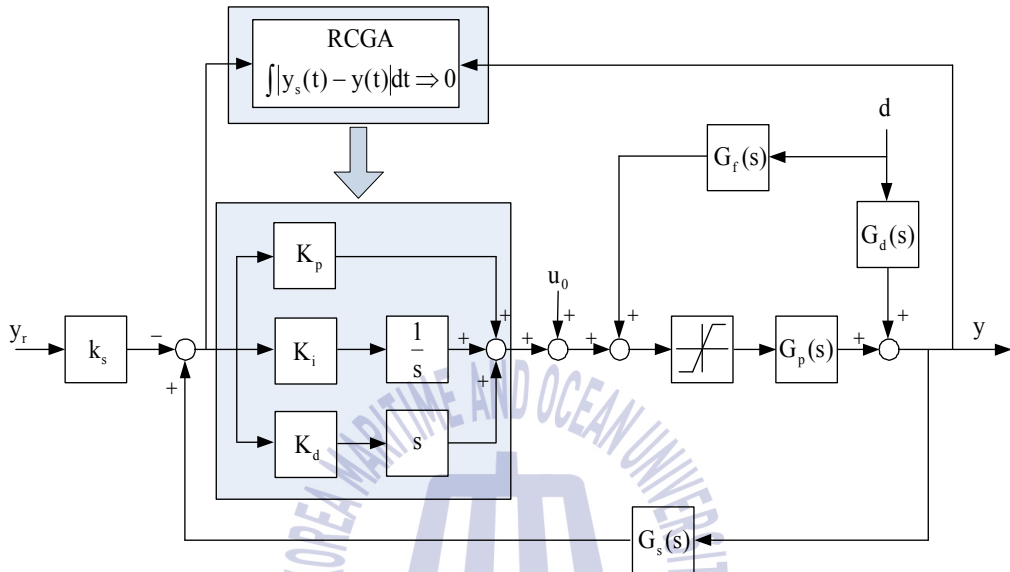


Figure 5.2 Parameter optimization of PID controller using RCGA

본 논문에서는 RCGA를 이용할 때 필요한 파라미터 값은 Table 5.1과 같이 설정을 했다.

Table 5.1 Parameters of RCGA

Parameters	Generation	Population	Crossover	Mutation
Value	50	30	0.9	0.05

Figure 5.3은 RCGA를 이용하여 PID 제어기의 이득 K_p , K_i , K_d 를 탐색하는 과정을 나타낸 것이다.

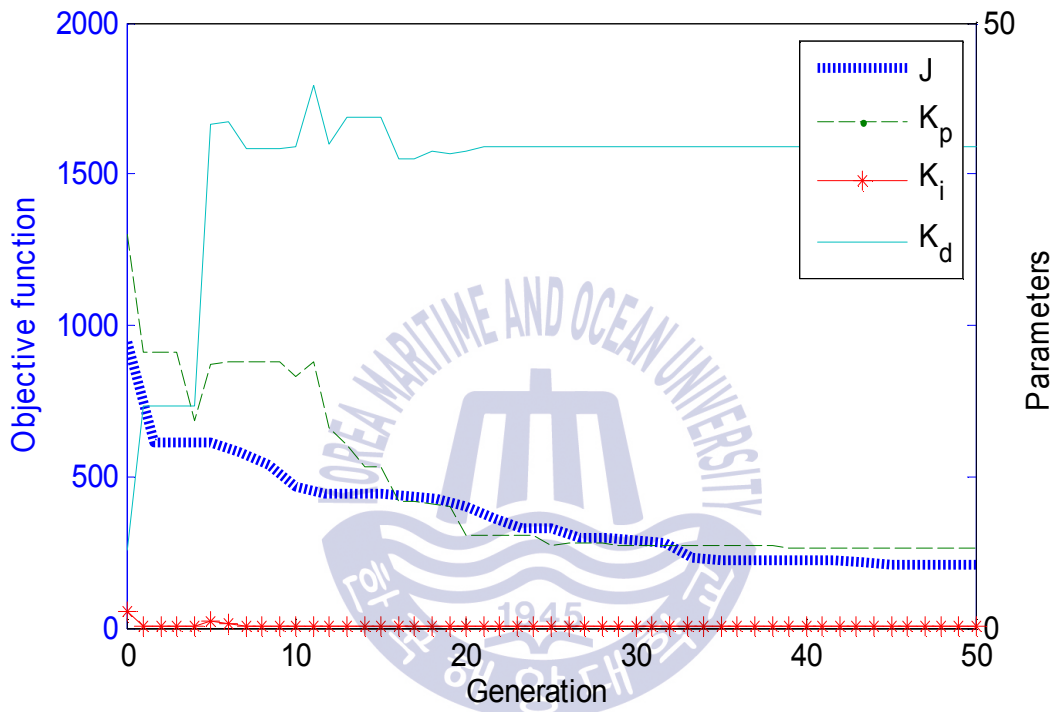


Figure 5.3 RCGA-based tuning for parameters of controller

제 6 장 시뮬레이션 및 검토

제안한 제어기의 유효성을 검증하기 위해 샘플링 시간을 0.01[s]로 하여 시뮬레이션을 실시하고 제안한 제어기를 Z-N 기법 및 IMC 기법과 비교하였다.

Table 6.1은 Z-N 기법 및 IMC 기법, 제안하는 기법으로부터 구한 제어기의 파라미터들을 정리하여 나타낸 것이다.

Table 6.1 Parameters of the PID controller tuned by each technique

Technique	PID controller		
	K_p	K_i	K_d
Proposed	6.636	0.081	39.717
Z-N	9.879	0.574	42.579
IMC	1.502	0.051	1.610

6.1 PID 제어기의 목표값 추종 성능

Figure 6.1은 외란입력인 온도는 변화 없고 정상상태 50[°C]로 작동하고 있는 상태에서 목표값을 60[°C]로 변경한 경우의 출력과 제어입력이다.

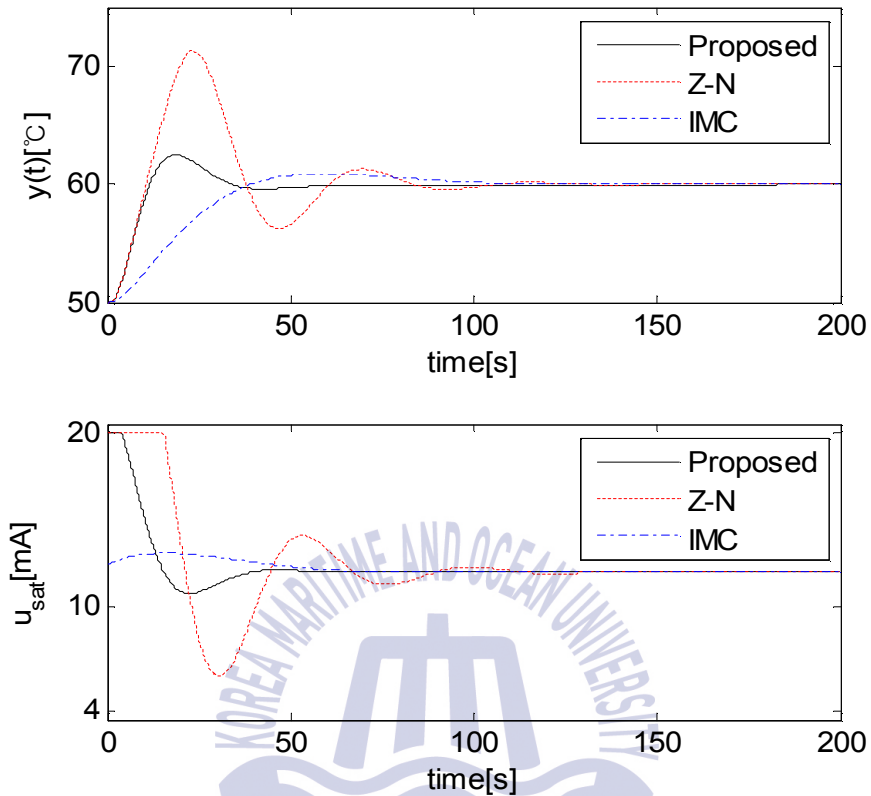


Figure 6.1 Step responses and control inputs for each technique

Table 6.2는 정량적인 비교를 위해 상승시간, 오버슈트, 정정시간 및 절대오차적분을 정리하여 나타낸 것이다.

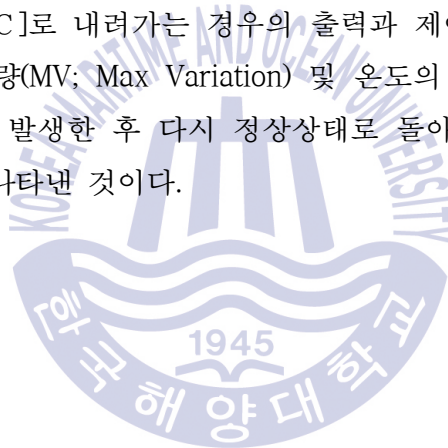
Table 6.2 Performances for each technique

	Proposed	Z-N	IMC
Rise time[s]	7.31	6.76	26.62
Overshoot[°C]	62.49	71.26	60.93
Settling time[s]	53.49	100.86	98.56
IAE	112.74	330.25	220.98

Figure 6.1과 Table 6.2를 살펴보면 상승시간은 Z-N 기법이 가장 짧지만 오버슈트 값과 정정시간은 아주 크고 제어기의 출력 u 가 포화상태로 되어 성능이 우수하지 못하다. IMC 기법은 오버슈트는 다른 기법보다 조금 작고 제어기의 출력 u 가 포화상태로 되지 않지만 상승시간과 정정시간이 매우 크다. 제안한 RCGA 기법은 오버슈트는 다른 기법과 거의 유사하지만 상승시간과 정정시간이 매우 작아 우수한 결과를 보여주고 있다.

6.2 PID 제어기의 외란제거 성능

Figure 6.2는 목표값을 $50[^\circ\text{C}]$ 로 고정하고 열교환기로 들어오는 유체의 입구 온도가 $30[^\circ\text{C}]$ 에서 $20[^\circ\text{C}]$ 로 내려가는 경우의 출력과 제어입력이다. Table 6.3은 이때 온도의 최대변화량(MV; Max Variation) 및 온도의 최대변화량이 일어나는 시간(MV time), 외란이 발생한 후 다시 정상상태로 돌아오는 회복시간 및 절대 오차적분을 정리하여 나타낸 것이다.



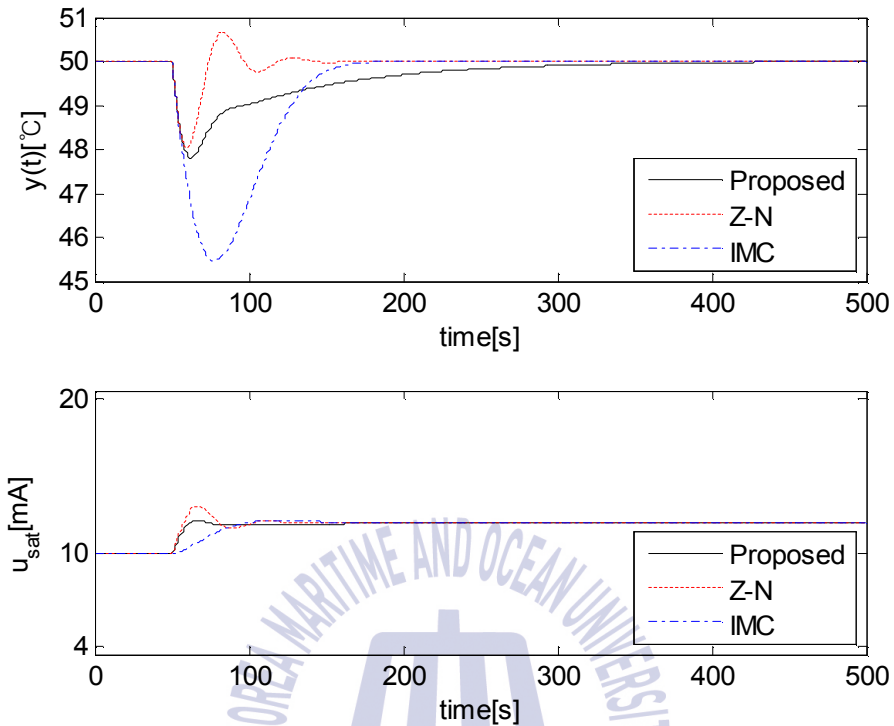


Figure 6.2 Disturbance rejection performance for each technique

Table 6.3 Disturbance rejection performance for each technique

	Proposed	Z-N	IMC
MV time[s]	62.41	60.03	77.84
MV[°C]	-2.19	-1.96	-4.52
Recovery time[s]	190.06	137.61	159.61
IAE	98.73	43.48	242.49

Figure 6.2와 Table 6.3을 살펴보면 Z-N 기법은 최대변화 온도와 회복시간의 측면에서는 가장 우수하지만 헌팅이 많이 발생하고 있다. IMC 기법은 최대변화 온도와 회복시간이 매우 커 우수하지 못하다. 제안한 RCGA 기법은 최대변화 온도는 Z-N 기법과 거의 유사하지만 회복시간이 매우 긴 결과를 보여주고 있다.

6.3 피드포워드 제어기를 결합한 PID 제어기의 성능

앞에서 RCGA로 동조한 PID 제어기가 나머지 두 기법 Z-N, IMC보다 목표값 추종 면에서 비교적 좋은 성능임을 확인하였다. 하지만 외란제거 성능은 만족스럽지 못하므로 이를 보완하고자 피드포워드 제어기를 결합하였다. Figure 6.3을 살펴보면 피드포워드 제어기는 목표값 추종 성능에는 전혀 영향을 미치지 않으므로 앞에서 살펴본 피드포워드를 결합하지 않은 PID 제어기와 목표값 추종성능은 동일하다.

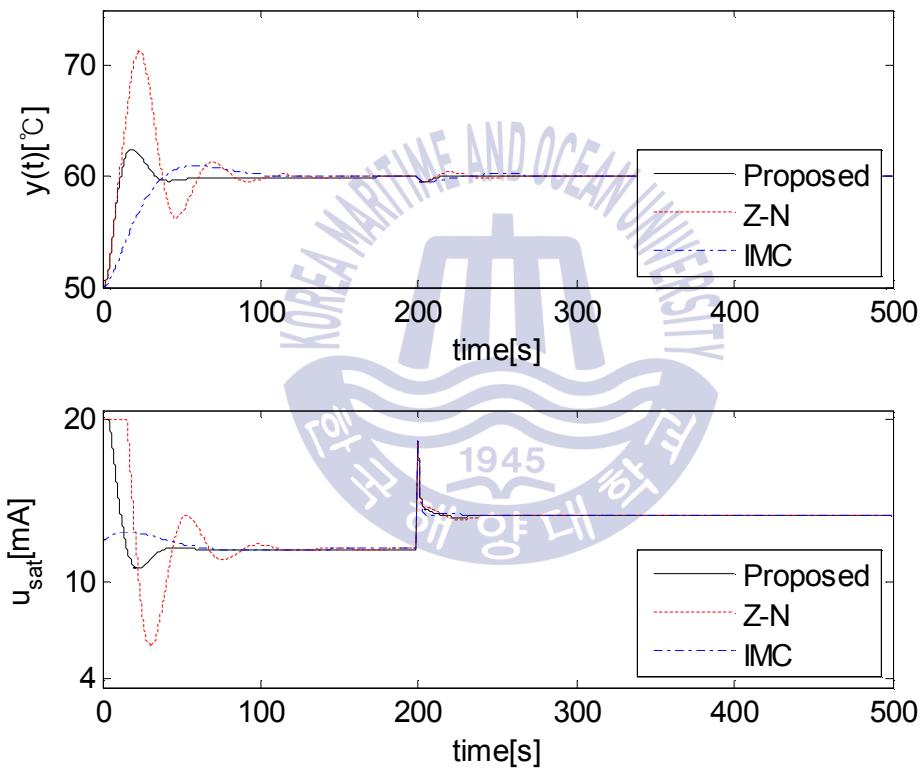


Figure 6.3 Step responses and control inputs for each technique combined with feedforward controller

그러므로 외란제거 성능 부분만을 집중적으로 Figure 6.4에 나타내었다. Table 6.4는 이때 온도의 최대변화량 및 온도의 최대변화량이 일어나는 시간, 회복시간 및 절대오차 적분을 정리하여 나타낸 것이다.

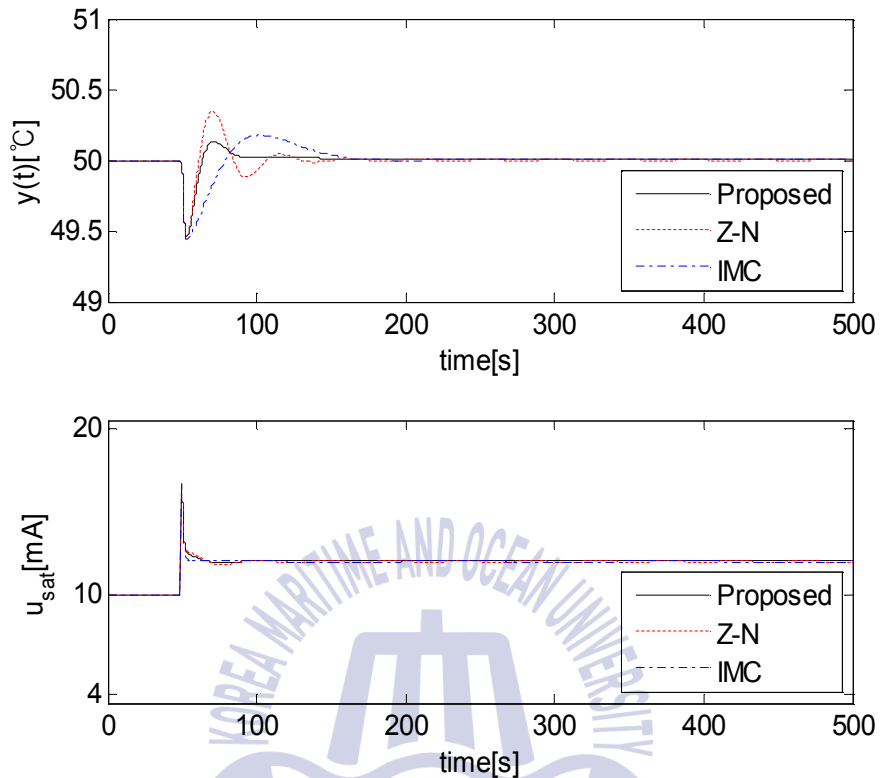


Figure 6.4 Disturbance response and control input for each technique of PID controller combined with feedforward controller

Table 6.4 Disturbance rejection performance of PID controller combined with feedforward controller

	Proposed	Z-N	IMC
MV time[s]	53	53	94.13
MV[°C]	-0.55	0.55	-0.57
Recovery time[s]	122.53	94.60	130.34
IAE	7.25	11.29	44.13

피드포워드 제어기를 결합한 경우의 결과 값을 정리한 Table 6.4와 기본적인 PID 제어기의 결과 값을 정리한 Table 6.3을 비교해 보면 외란제거 성능이 월등하게 개선되었음을 알 수 있다.

6.4 피드포워드 제어기 유무에 따른 PID 제어기의 외란제거 성능

RCGA를 이용하여 동조한 PID 제어기에 피드포워드 제어기의 결합 유무에 따른 외란제거 성능을 확인하기 위한 결과를 Figure 6.5에 나타내었다. 이때의 성능을 Table 6.5에 요약하였으며 온도의 최대변화량, 회복시간, 절대오차적분 등을 고려해보면 외란제거에 대한 모든 부분에서 성능이 개선된 것을 알 수 있다.

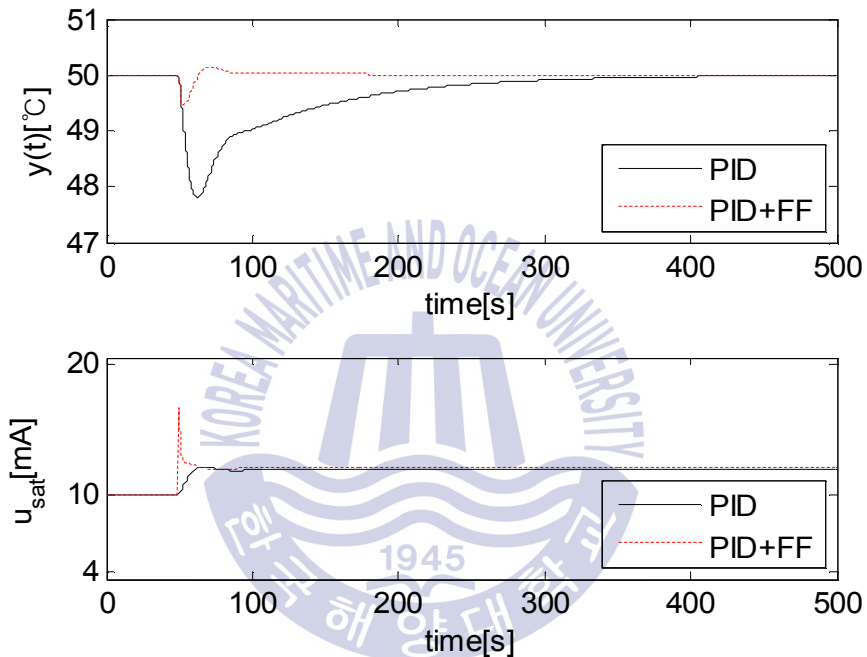


Figure 6.5 Responses of disturbance rejection for PID controller and PID+FF controller

Table 6.5 Disturbance rejection performances for PID controller and PID+FF controller

	PID	PID+FF
MV time[s]	62.41	53
MV[°C]	-2.19	-0.55
Recovery time[s]	190.06	122.53
IAE	98.73	7.25

제 8 장 결 론

열교환기는 운전온도까지 도달 할 때에는 수동모드로서 추종제어 형태를 보이지만 운전온도에 도달하여 자동모드로 전환된 이후에는 외란만을 억제하도록 운전된다. 본 논문에서는 이를 반영하기 위해 추종제어인 경우에는 일반적인 PID 제어기 형태를 사용하고, 외란억제 운전시에는 PID 제어기와 피드포워드 제어기가 결합된 형태의 제어시스템을 제안하였다. 우선 추종제어인 경우 RCGA를 이용하여 IAE 평가함수가 최소가 되는 관점에서 최적으로 PID 제어기를 동조하였고, 정량적 비교를 위해 Z-N 및 IMC 방법으로 동조된 PID 제어기와 함께 시뮬레이션을 실시하였다. 그 결과 RCGA로 동조한 PID 제어기가 나머지 두 기법의 PID 제어기 보다 정량적으로 좋은 성능을 나타내었으나 외란제거 성능은 만족스럽지 못함을 확인하였다. 따라서 이와 같은 단점을 보완하고자 PID 제어기에 피드포워드 제어기를 결합하는 방법을 제안하였다. 이 경우에도 PID 제어기는 RCGA로 최적동조하였으며 추종문제와 동일한 IAE 평가함수를 사용하였다. 제안한 방법의 타당성을 확인하기 위해 외란이 인가되는 환경에서 Z-N 및 IMC 방법으로 동조된 PID 제어기와 함께 시뮬레이션을 실시하여 그 유효성을 검토하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

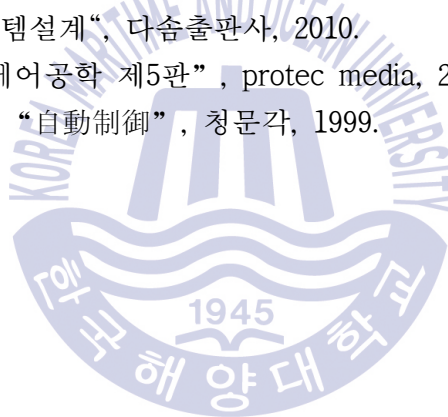
- 외란제거 성능 비교에서 정량적으로 RCGA 기법으로 동조한 PID 제어기와 피드포워드 제어기가 결합된 제어시스템이 기존의 Z-N, IMC 기법으로 동조된 PID 제어기보다 우수한 제어성능을 보였다.
- PID 제어기와 피드포워드 제어기를 결합한 경우 PID 제어기만을 단독으로 사용할 때 보다 최대 온도변화량이 약 1/4배 정도로 감소하였고, 외란 후 다시 정상상태로 돌아오는 회복 시간은 약 35.5% 감소되었다.

이를 종합해보면 제안한 방법의 PID 제어기는 Z-N 기법 및 IMC 기법보다 목표값 추종성능 및 외란제거 성능 면에서 우수한 결과를 보였다.

참고문헌

- [1] <http://terms.naver.com/entry.nhn?docId=507893&cid=42380&categoryId=42380>
- [2] V. Krishna Vinaya, K. Ramkumar and V. Alagesan, “Control of heat exchangers using model predictive controller,” Proc. of the 2012 IEEE Int. Conf. on Advances In Engineering, Science And Management, pp. 242-246, Tamil Nadu, India, 2012.
- [3] M. Pandey, K. Ramkumar and V. Alagesan, “Design of fuzzy logic controller for a cross flow shell and tube heat-exchanger,” Proc. of the 2012 IEEE Int. Conf. on Advances In Engineering, Science And Management, pp. 150-154, Tamil Nadu, India, 2012.
- [4] P. Sivakumar, D. Prabhakaran, and T. Kannadasan, “Temperature control of shell and tube heat exchanger by using intelligent controllers-case study,” Int. J. of Computational Engineering Research, vol. 2, no. 8, pp. 285-291, 2012.
- [5] M A Ahmad, A A Ishak and N K Ismail, “New hybrid model reference adaptive supervisory fuzzy logic controller for shell-and-tube heat exchanger temperature system”, Proc. of the 2012 IEEE Control and System Graduate Research Colloquium, pp. 49-54, Shah Alam, Malaysia, 2012
- [6] S. Padhee, “Controller design for temperature control of heat exchanger system: Simulation studies” , National Institute of Technology, vol 9, pp. 485-491, 2014.
- [7] 최순만, “주기관 차케트냉각수 온도를 위한 피드포워드 제어시스템의 구성과 분석” , 한국마린엔지니어링학회지, 제32권, 8호, pp. 1303-1308, 2008.
- [8] 소건백, “RCGA에 기초한 비선형 PID 제어기의 설계” , 한국해양대학교 대학원 공학석사 학위논문, 2014.
- [9] <http://terms.naver.com/entry.nhn?docId=707043&cid=42318&categoryId=42318>
- [10] <http://terms.naver.com/entry.nhn?docId=2301866&cid=42419&categoryId=42419>
- [11] 안종갑, “피드포워드 제어와 안티와인드업 기법을 결합한 열교환기 시스템의 RCGA기반 PID 제어” , 한국해양대학교 대학원 공학박사 학위논문, 2016.
- [12] H. Yamashita, “Analysis of th dynamic characteristics of cross-flow heat

- exchangers with boh fluids unmixed” , Bull. JSME, vol. 21 (153), pp 479-485, 1978.
- [13] 진강규, “유전알고리즘과 그 응용” , 교우사, 2010.
- [14] J. H. Holland, “Adaptation in atural and artificial systems” , University of Michigan Press, Ann Arbor, MI, 1975.
- [15] D. E. Goldberg, Genetic algorithms in search, Optimization and Machine Learning, Addison-Wesley, 1989.
- [16] D. T. Pham and G. Jin, “A hybrid genetic algorithm” , Proc. 3rd World Conf. on Expert Systems, Seoul, Korea, vol. 2, pp. 748-757, 1996.
- [17] G. Jin and S. Ju, “A study on a real-coded genetic algorithm,” Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, vol. 6, no. 4, pp. 268-275, 2000.
- [18] K. A. De Jong, “An analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems” , Doctoral Dissertation, The University of Michigan, Ahn Arbor, Michigan, 1975.
- [19] 진강규, “제어시스템설계“, 다솜출판사, 2010.
- [20] K. Ogata, “현대제어공학 제5판” , protec media, 2016.
- [21] Benjamin C. Kuo, “自動制御” , 청문각, 1999.



감사의 글

제 인생에서 석사의 길을 택함으로써 거쳐 가야 할 큰 고개를 넘기며 이 글을 바칩니다. 2년이라는 길 것 같았던 시간이 막상 이 글을 쓰려고 되돌아보니 굉장히 짧게 느껴지는 것 같습니다. 아마 혼자 이런 논문을 완성하라고 했다면 졸업은 꿈꿀 수 있을지 상상도 못할 것 같습니다. 주변의 많은 분들의 보살핌, 가르침 덕에 지금 이 시점까지 올 수 있었습니다. 가장 먼저 저의 지도교수가 되어 주신 소명옥 교수님께 감사드립니다. 학교 수업 외에도 여러 직위 때문에 굉장히 바쁘신 와중에도 밤새 시간 내셔서 지도해 주시는 모습 정말 존경스러웠습니다. 또한 거의 2년 동안 MATLAB이라는 생소한 프로그램을 다룰 수 있도록 청강을 허락해 주신 진강규 교수님 정말 감사드립니다. 수업시간에는 못 느꼈지만 막상 논문을 위해 MATLAB을 작성하면 교수님 수업을 들었던 것을 정말 대학원 생활 중에 잘했던 후회 없고 뿌듯한 일 중 하나라고 생각합니다. 그리고 자기 직장이 있는 와중에도 논문을 위해 평일 밤이나 주말에 세미나를 자주 해주신 우리 연구실 안종갑박사님, 해양수산연수원 이윤형교수님 정말 고생 많으셨습니다. 후배 입장에서 이런 분들 덕에 우리 연구실이 멋지게 돌아갈 수 있도록 돕고 있습니다. 우리 연구실은 아닌 공대 박사과정 중이지만 모르는 점이나 어려운 부분 필요할 때마다 물어보면 편하게 답해주는 소건백 선배님께도 이 감사의 글을 올립니다. 그리고 형이자 내 석사 동기인 이유수 형님, 형이 있어서 그래도 혼자라는 느낌은 덜 받으며 석사과정 마무리 한 것 같습니다. 초기엔 조교하시다가 뒤늦게 마지막 학기에 그만두시다 보니 서로 석사과정 마무리를 하다보니 붙어있어도 서로 말은 잘 못한거 같네요. 이 2년간의 경험이 우리 인생의 또 다른 기회가 될 수 있는 밑거름이 되길 바라며, 새로 들어온 강민, 고건도 남은 기간 활용 잘하길 바랍니다!

한국해양대학교 기관공학과
최효성 올림