creative commons
COMMONS DEED

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

dCollection

공학석사 학위논문

퍼지 게인 스케쥴링에 기초한 연속교반탱크 반응기의 2자유도 PID 온도 제어

Fuzzy Gain Scheduling-Based 2 DOF PID Temperature Control of a Continuous Stirred Tank Reactor

지도교수 김 종 화

2013년 8월

한국해양대학교 대학원

제 어 계 측 공 학 과

고 강 영

본 논문을 고강영의 공학석사 학위논문으로 인준함.

위원장 조 석 제 (인)

위 원 하 윤 수 (인)

위 원 김 종 화 (인)

2013년 07월 22일

한국해양대학교 대학원

dCollection

목 차

List of Tables ····· iii
List of Figures ····· iv
Abstract ····· v

제 1 장 서론
1.1 연구 배경 ····· 1
1.2 연구 목적 및 방법 ····· 2
1.3 연구 구성 및 내용 ····· 2

제 2 장 CSTR 프로세스
2.1 연속교반탱크반응기란? ····· 4
2.2 CSTR의 구조 ····· 4
2.3 CSTR의 수학적 모델 ····· 6
2.3.1 시간영역의 수학적 모델 ····· 6
2.3.2 CSTR의 전달함수 표시 ····· 8
2.3.3 동작점의 변화에 따른 CSTR의 해석 ····· 10

제 3 장 2 DOF PID제어기의 퍼지 게인 스케쥴링
3.1 2 DOF PID제어기 ····· 11
3.1.1 2 DOF PID 제어기의 개요 ····· 11
3.1.2 등가 2 DOF PID 제어기 ····· 14
3.2 적분기 안티와인드업 ····· 16
3.3 EA에 기초한 2 DOF PID 제어기의 동조 ····· 17
3.4 퍼지 게인 스케쥴링 ····· 20

Collection

제 4 장 모의실험 및 결과 검토

4.1 CSTR의 파라미터 ····· 25

4.2 지역모델과 지역제어기 동조 ····· 26

4.3 외란 억제성능 ····· 29

4.4 설정치 추종성능 ····· 33

4.5 잡음 억제성능 ····· 37

제 5 장 결론 ····· 40

참고문헌 ····· 42

dCollection

List of Tables

Table 4.1 Data for simulation ····· 25
Table 4.2 Process parameters at three operating points ····· 26
Table 4.3 Controller parameters tuned at three operating points ····· 27
Table 4.4 Process performance when w(t) is step-wisely decreased from 24[kg/min] to 12[kg/min] ····· 31
Table 4.5 Process performance when w(t) is step-wisely increased from 12[kg/min] to 24[kg/min] ····· 33
Table 4.6 Process performance when w(t)=24[kg/min] ····· 35
Table 4.7 Process performance when w(t)=16[kg/min] ····· 37

KOREA MARITIME UNIVERSITY 1945 한국해양대학교

dCollection

List of Figures

Fig. 2.1 Temperature control process of a CSTR ····· 5
Fig. 2.2 Controlled process with a nonlinear saturator ····· 9
Fig. 2.3 Step responses corresponding to 10% change of u(t) for mass flow w(t) changes ····· 10
Fig. 3.1 The 2 DOF PID control system ····· 12
Fig. 3.2 Equivalent 2 DOF PID controller ····· 15
Fig. 3.3 2 DOF PID controller with anti-windup ····· 17
Fig. 3.4 2 DOF PID control system with anti-windup ····· 18
Fig. 3.5 r(t) and w(t) signals used for controller parameter tuning ····· 19
Fig. 3.6 Disturbance rejection response of the 2 DOF PID controller with fixed parameters tuned at w(t)=24[kg/min] ····· 21
Fig. 3.7 Fuzzy partitions of the scheduling variable w(t) ····· 22
Fig. 3.8 Overall control system with a fuzzy gain scheduler ····· 24
Fig. 4.1 I/O relationship of the fuzzy system for fuzzy gain scheduling ····· 28
Fig. 4.2 Step changes of w(t) ····· 29
Fig. 4.3 Disturbance rejection responses when w(t) is step-wisely decreased from 24[kg/min] to 12[kg/min] ····· 30
Fig. 4.4 Disturbance rejection responses when w(t) is step-wisely increased from 12[kg/min] to 24[kg/min] ····· 32
Fig. 4.5 Set-point tracking responses when w(t)=24[kg/min] ····· 34
Fig. 4.6 Set-point tracking responses when w(t)=16[kg/min] ····· 36
Fig. 4.7 Disturbance rejection responses when w(t) is step-wisely decreased under noise environment ····· 38
Fig. 4.8 Control input when w(t) is step-wisely decreased under noise environment (a) Proposed method (b) Z-N method ····· 39

Collection

Fuzzy Gain Scheduling-Based 2 DOF PID Temperature Control of a Continuous Stirred Tank Reactor

Ko, KangYoung

Department of Control & Instrumentation Engineering
Graduate School of Korea Maritime University

Abstract

A continuous stirred tank reactor(CSTR) is a highly nonlinear process with varying parameters during operation. Therefore, tuning the controller and determining the transition policy of controller parameters are required to guarantee the best performance of the CSTR for overall operating regions.

In this paper, a technique combining the two-degree-of-freedom(2 DOF) PID controller with a fuzzy gain scheduler is presented for temperature control of the CSTR.

First, both an evolutionary algorithm(EA) and a local model are used to obtain a set of the optimal controller parameters for each operating region by minimizing the integral of absolute error(IAE). Then, the controller parameters are expressed as functions of the gain scheduling variable. Those functions are implemented using a set of "if-then" fuzzy rules, of which forms are Sugeno's form. Simulation works for reference tracking and disturbance rejecting performances assures the possibility of using the proposed method for the temperature control of the CSTR.

Collection

제 1 장 서론

1.1 연구 배경

지난 수십 년 동안 유화공, 우주항공, 군수, 발전, 조선을 포함한 여러 분야에서 보다 정밀하고 안정된 성능을 주는 제어기를 설계하려는 많은 노력들이 있어 왔다. 특히 화학 공정에서 많이 사용되는 연속교반탱크반응기(CSTR)는 열의 저장과 방출에 있어서 매우 비선형적이고 또 동작영역에 따라 파라미터 변동이 심한 프로세스이어서 전 동작영역에서 만족스러운 성능을 제공하는 제어기를 설계하는 것이 쉽지 않다[1,2]. 이 때문에 CSTR 프로세스 제어와 관련된 기존의 연구들은 적응제어 기법을 사용하거나 아니면 동작 영역에 맞는 제어기 파라미터를 미리 계산해 놓고 이들을 온라인 스케쥴링하는 방법에 주로 초점을 맞추고 있다[3~8].

적응제어와 관련하여 Pan 등은 하위 계층에는 PID 제어기를, 상위 계층에는 입출력 데이터를 기반으로 선형화 모델을 식별하고 제어기 파라미터를 동조하는 2계층 구조의 CSTR 제어 알고리즘을 제안하였고[3], Nikravesh 등은 CSTR 프로세스와 그 수학적 역동력학을 신경회로망(NN)으로 학습하고 제어하였고[4], Vinodha 등은 다변수 CSTR 프로세스를 제어하기 위해 두 가지 Multi-loop PID 제어 알고리즘을 제안하였다[5].

스케쥴링과 관련하여 Engell와 Klatt는 선형 주파수영역 설계기법과 게인 스케쥴링(Gain scheduling)을 결합하는 방법을 제안하였고[6], Banu와 UMA는 CSTR의 농도를 PID제어하는 화학공정 프로세스에서 GA로 PID 제어기를 동조하고 퍼지 게인 스케쥴링 하는 방법을 제안하였고[7], Rahmat 등은 Imperialist Competitive 알고리즘을 사용하여 PI 제어기의 파라미터를 동조하고 퍼지기법으로 온라인 스케쥴링하는 방법을 제안하였다[8]. 이

Collection

들은 나름대로 만족스러운 성과를 제시하고 있으나 모두 표준형 1자유도 PID 제어기를 근간으로 하고 있고 또 적분기 와인드업을 고려 못하고 있다.

따라서 기존 연구의 단점을 개선하도록 EA를 이용하여 시간지연을 갖는 적분시스템용 PID 제어기의 동조규칙을 체계적으로 얻어 최적의 파라미터 값들을 적용시켜 보다 나은 성능의 제어기를 제안하고자 한다.

1.2 연구 목적 및 방법

CSTR의 목적은 그 날의 생산량에 따라 운전조건이 달라져도 출구온도를 일정하게 유지시켜 생산하는 데 있다. 따라서 본 논문에서는 기존 연구에서 다루지 못한 점을 보완하여 CSTR 프로세스의 온도제어를 위해 퍼지 게인 스케쥴링에 기초한 2 DOF PID 제어기를 설계하는 문제를 다룬다. 이를 위해 1 DOF PID 제어기의 한계성을 보완해 설정치 추종성능(Tracking performance)을 동시에 개선하도록 2 DOF PID 제어기를 사용하고, 포화기로부터 일어날 수 있는 적분기 와인드업 문제를 극복하기 위해 적분기 안티와인드업 기법을 채용한다.

한편 CSTR는 동작점에 따라 파라미터가 심하게 변동하므로 고정 파라미터 제어기로 전 동작구간에 운전하면 성능이 좋지 못할 뿐 아니라 경우에 따라서는 불안정해질 수도 있기 때문에, 동작점에서 얻은 지역모델과 진화알고리즘을 기반으로 지역 2 DOF PID 제어기를 최적 동조하고 이를 퍼지기법으로 게인 스케쥴링한다. 제안하는 방법은 시뮬레이션을 통해 기존의 방법과 비교하여 그 유효성을 확인한다.

1.3 연구 구성 및 내용

본 논문은 모두 5장으로 구성되며, 각 장에서 수행한 구체적인 연구내용은 다음과 같다. 2장에서는 본 논문의 기본이 되는 CSTR의 수학적 모

Collection

델에 대하여 자세히 설명한다. 3장에서는 기존의 1 DOF PID 제어기의 문제점을 소개하고, 이를 보완하기 위해서 안티 와인드업 기법을 채용한 2 DOF PID 제어기를 제안하며, 파라미터들을 최적 동조 한다. 4장에서는 제안한 방법을 시뮬레이션을 통해 기존의 방법과 결과를 비교분석하고 그 효용성을 검증한다. 5장에서는 4장에서의 결과와 고찰을 바탕으로 최종적인 결론을 도출한다.

Collection

제 2 장 CSTR 프로세스

2.1 연속교반탱크반응기란?

연속교반탱크반응기(Continuous stirred-tank reactor: CSTR)는 화학공정 등에서는 강력한 교반이 요구될 때 사용되는 이상적인 반응기로서, 간단히 CSTR 또는 Back mix 반응기로도 불린다. 반응기에 유체들(원료, 촉매 등)이 유입되면 순간적으로 반응이 일어나고, 교반기에 의해 혼합이 일어나게 되며, 이 때 반응기 내의 온도는 가열 또는 냉각 장치를 통해 일정하게 유지된다.

CSTR을 모델링할 때에는 편의상 이상적인 동작특성을 가진 것으로 가정하게 된다. 따라서 이상적인 CSTR의 반응기 내의 유체들은 교반기에 의해 완전하게 섞이고 공간적으로 균일한 상태를 이루며, 반응기의 출구 생산물의 상태는 반응기 내부의 상태와 같은 것으로 가정한다.

현장에서 CSTR은 유체의 용량에 따라 단독으로 사용되거나, 여러 개가 직병렬 연결 사용한다.

2.2 CSTR의 구조

본 논문에서 다루게 될 CSTR의 구조는 다음 그림 2.1과 같다. 그림 2.1은 일반적으로 산업현장에서 사용되는 CSTR을 단순화한 형태로서, 그 구조는 크게 반응기, 교반기, 히터, 센서 및 제어기로 구성된다. 반응기는 입력되는 원료를 수용하고 그 안에서 반응이 일어나도록 만들어진 용기이며, 모터와 직결 프로펠러로 구성된 교반기는 유체들을 섞어 혼합유체의 밀도가 공간적으로 균일하도록 해주며, 히터는 전력변환기로부터 공급 전

Collection

원을 받아 유체를 가열해 주는 역할을 하며, 유량 및 온도센서는 각각 입구 측의 유량과 입출구 측의 온도를 측정하며, 제어기는 반응기의 내부 온도가 항상 희망 온도, 즉 설정치에 유지되도록 제어하게 된다.

CSTR의 온도 설정치는 대부분의 운전시간 동안에는 일정하게 유지되고, 그날의 생산량의 증가 또는 감소 결정에 따라 입구 측의 유량을 변경하는 방식으로 운전된다.

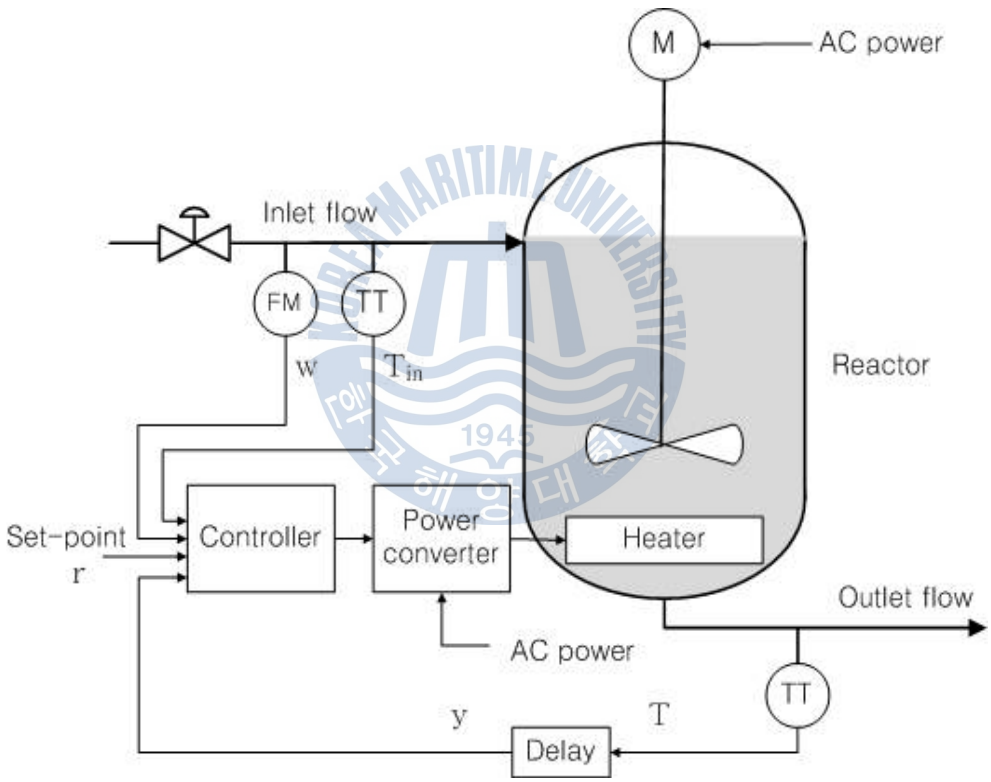

그림 2.1 CSTR의 온도제어 프로세스

Fig. 2.1 Temperature control process of a CSTR

Collection

2.3 CSTR의 수학적 모델

일반적으로 CSTR은 열의 저장과 방출에 있어서 비선형 요소들을 내포하고 있고 또 복잡한 분포정수(Distributed parameter) 프로세스이어서 정확하게 모델을 얻고 해석하는 것이 대단히 어려우므로, 본 논문에서는 문제를 단순화하기 위해 다음과 같은 가정을 하며 CSTR은 집중정수(Lumped parameter) 프로세스로 간주하고 모델링한다.

(1) CSTR 내의 유체 온도는 같다. 즉 CSTR 내의 유체는 교반기에 의해 잘 교반된다.
(2) CSTR의 입출력 유량은 같다. 즉 입구 측으로 흘러 들어온 유량만큼 출구 측으로 흘러 나간다.
(3) 가열기 자체에는 열에너지가 축적되지 않는다. 즉 가열기에 공급된 파워는 모두 유체에 열에너지 형태로 전달된다.
(4) 외부로의 열손실이 적다. 즉 CSTR은 잘 단열되어 외부로 빠져나가는 열손실이 적다.

2.3.1 시간영역의 수학적 모델

CSTR을 제어볼륨(Control volume)으로 설정하고 열에너지 보존을 적용하면 다음 식 (2.1)이 만족되고,

$$\frac{dE(t)}{dt} = \sum_i Q_i(t) \tag{2.1}$$

여기서 E(t)[J]는 열에너지를, Q_i(t)[J/s]는 i번째의 열량의 변화율을 뜻한다.

한편 E(t)는 온도와 질량의 곱에 비례하며 다음 식으로 주어진다.

Collection

$$E(t) = cmT(t) = c\rho VT(t) \tag{2.2}$$

여기서 c[J/kgK]는 열용량, m[kg]은 질량, T(t)[K]는 절대온도로 표시되는 출구 측 온도, ρ[kg/㎥]는 밀도, V[㎥]는 체적을 의미한다.

CSTR 반응기 내의 열량 변화는 가열기와 입출구 측의 유체로 인해 발생되므로, 먼저 가열기로 인한 열량 변화를 살펴본다. 가열기로부터 공급되는 파워는 모두 반응기 내의 유체에 전달되므로 다음 식으로 주어진다.

$$Q_1(t) = K_h u(t) \tag{2.3}$$

여기서 K_h[w/%]는 가열기의 이득이고 u(t)는 제어변수로서 0~100[%] 사이의 값을 갖는다.

한편 입구 측 유량으로부터 얻는 열량 변화는 다음 식으로 표시된다.

$$Q_2(t) = cw(t)T_{in}(t) \tag{2.4}$$

여기서 w(t)[kg/s]는 질량유량, $T_{in}(t)$[K]는 입구 측 유체의 온도이다.

출구 측 유량으로부터 손실되는 열량 변화는 다음 식으로 기술된다.

$$Q_3(t) = -cw(t)T(t) \tag{2.5}$$

식 (2.3)-(2.5)를 식 (2.1)의 에너지 평형식에 대입하면

$$\frac{dE(t)}{dt} = Q_1(t) + Q_2(t) + Q_3(t)$$

Collection

$$= K_h u(t) + cw(t)[T_{in}(t) - T(t)] \tag{2.6}$$

식 (2.2)를 대입하고 정리하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$c\rho V \frac{dT(t)}{dt} = -cw(t)T(t) + K_h u(t) + cw(t)T_{in}(t) \tag{2.7}$$

한편 교반기를 사용하여 CSTR 내 유체를 잘 교반하더라도 현실적으로는 항상 유체 온도에 약간이나마 비동질성이 존재하게 된다. 이러한 비동질성을 모델에 반영하여 현실성을 더하기 위해 온도 측정 시 시간지연 L[s]이 존재하는 것으로 간주하고, 문제를 단순화하기 위해 L은 질량유량 w(t)에 반비례하는 것으로 가정한다[2].

$$y(t) = T(t-L) = T[t - \frac{K_s}{w(t)}] \tag{2.8}$$

여기서 $L = K_s/w(t)$이고 K_s[kg]는 상수이다.

2.3.2 CSTR의 전달함수 표시

식 (2.7)과 (2.8)로부터 d(t)=w(t)T_{in}(t)는 결합된 외란으로 간주하고 또 가열기에 존재하는 비선형 포화기를 생략하고 u(t)와 d(t)에 대한 y(t)의 전달함수를 구하면 다음 식으로 주어진다.

$$Y(s) = P(s)Y(s) + P'(s)D(s) \tag{2.9a}$$

$$\text{단, } P(s) = \frac{K}{1+\tau s} e^{-Ls} \tag{2.9b}$$

Collection

$$P'(s) = \frac{K'}{1+\tau s} e^{-Ls} \tag{2.9c}$$

$$K = \frac{K_h}{cw(t)}, \quad K' = \frac{1}{w(t)}, \quad \tau = \frac{\rho V}{w(t)}, \quad L = \frac{K_s}{w(t)} \tag{2.9d}$$

여기서 y(t)는 센서를 통해 계측되는 출구 측 유체의 온도, K와 K′ 는 이득, τ 는 시정수, L은 시간지연을 의미한다.

식 (2.9)의 전달함수식과 비선형 포화기로 기술되는 전체 제어대상을 블록선도로 나타내면 그림 2.2와 같다.

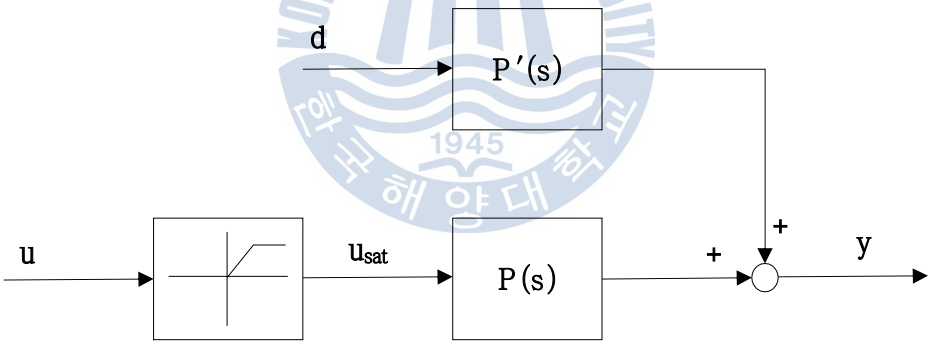

그림 2.2 비선형 포화기를 갖는 제어대상

Fig. 2.2 Controlled process with a nonlinear saturator

Collection

2.3.3 동작점의 변화에 따른 CSTR의 해석

식 (2.9)의 파라미터들은 질량유량 w(t)와 직접접인 연관성을 가지며, 그 크기는 w(t)에 반비례함을 알 수 있다. 이 때문에 제어대상은 운전되는 동작점(Operating point)의 변화에 따라 크게 영향을 받는 시변프로세스(Time-varying process)라는 것을 알 수 있다.

그림 2.3은 이를 그래프적으로 보여준다. $T_{in}(t)$는 20[℃]로 고정되고, w(t)가 각각 16, 20, 24[kg/min]에서 $y(t)=50$[℃]로 유지되고 있을 동안의 u(t)에 계단형태의 $\Delta u(t)=10$[%]를 증가시켰을 때의 개회로 응답 y(t)를 그린 것이다. 그림에서 보면 w(t)가 작을수록 이득 K와 시간지연 L은 커지게 됨을 확인할 수 있다.

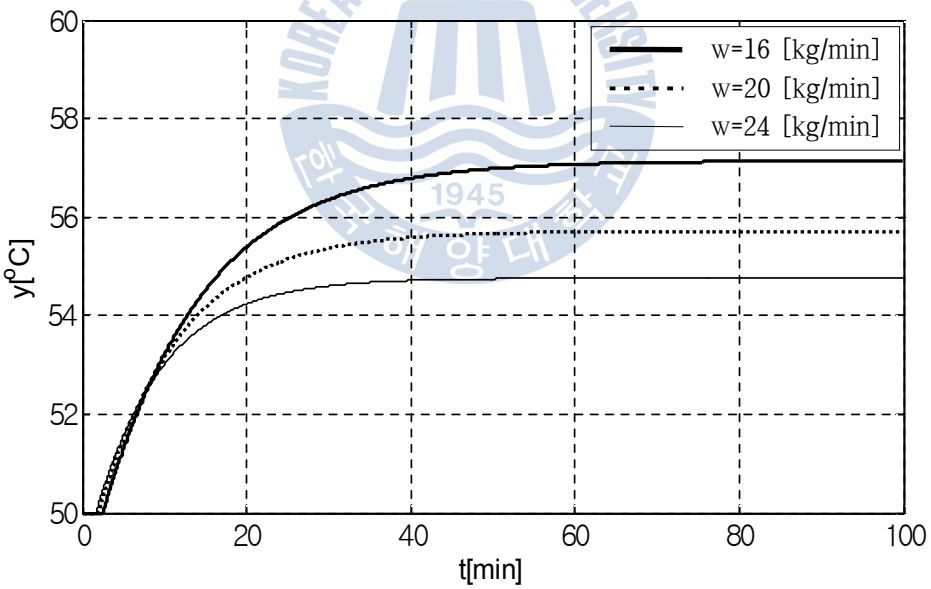

그림 2.3 w(t) 값의 변화에 대해 u(t)를 10% 증가시켰을 때의 응답

Fig. 2.3 Step responses corresponding to 10% change of u(t) for mass flow w(t) changes

Collection

제 3 장 2 DOF PID제어기의 퍼지 게인 스케쥴링

3.1 2 DOF PID 제어기

3.1.1 2 DOF PID 제어기의 개요

현재까지 PID 제어기의 동조와 최적화에 관한 많은 연구가 진행되어 왔지만[3~8], 기존의 1자유도(One-degree-of-freedom: 1 DOF) PID 제어기는 설정치 추종성능(Set point tracking performance)과 외란 억제성능(Disturbance refection performance)을 동시에 만족시키지 못하는 태생적인 한계를 지니고 있다. 설정치 추종성능이 만족되도록 파라미터들을 동조하면 추종속도는 빨라지나, 외란이 존재할 때 정상상태로 복귀하는 시간이 길어지고, 반대로 외란 억제성능이 만족되도록 동조하면 외란이 가해졌을 때는 신속하게 정상상태로 돌아오지만 설정치 추종 속도가 상대적으로 느려지는 단점을 가진다.

이러한 한계로 인해 어떤 PID 제어기는 두 종류의 파라미터 세트를 저장하고 있다가 제어 환경에 따라 적절히 스위칭하는 방법을 채택하기도 한다. 그러나 설정치 변경이 빈번하거나 또 외란이 예측할 수 없을 경우에는 이 방법도 효과적이지 못하다.

이러한 기존의 1 DOF PID 제어기의 한계를 극복하기 위해 1963년 Horowitz는 그림 3.1과 같은 구조의 2자유도(Two-degree-of-freedom: 2 DOF) PID 제어기를 제안하였다[9]. 2 DOF PID 제어기는 1 DOF PID 제어기 보다 파라미터가 더 많아 경험에 의존하던 그 당시에는 동조가 용이치 못해 70년대까지 큰 관심을 끌지 못하다가, 디지털프로세서의 성능이 향상되고 효과적인 최적화 알고리즘이 개발되면서 그 실효성이 새롭게 인식

Collection

되어 많은 연구가 진행되어 왔다.

그림 3.1과 같이 2 DOF PID 제어기는 주제어기 $C_1(s)$와 보조제어기 $C_2(s)$의 결합으로 이루어지는 구조를 가지며, 신호 r, y, u는 각각 설정치, 출력과 제어입력을 의미한다. 통상 $C_1(s)$는 피이드백 제어(Feedback control)를 통해 외란을 억제하며, 이와 독립적으로 $C_2(s)$는 피드포워드 제어(Feedforward control)를 통해 설정치 변경 시 주제어기의 비례동작과 미분동작을 적절히 제어하게 된다.

주제어기로 기존의 1 DOF 표준형 PID 제어기를 사용할 수도 있으나 미분동작은 물리적으로 구현이 어렵고, 설정치나 외란이 급작스럽게 변동하거나 또 센서를 통해 들어오는 잡음이 크면 미분폭주(Derivative kick) 현상을 일으키는 원인이 되므로 현장에서 주로 채용되고 있는 식 (3.1a)의 수정식을 사용한다. 전달함수 $C_1(s)$와 $C_2(s)$는 다음과 같다.

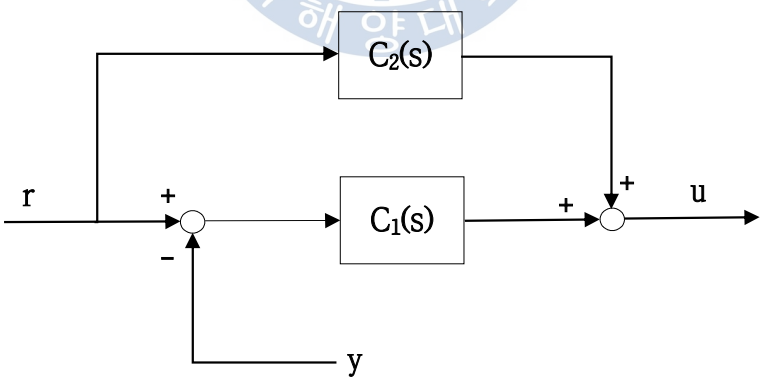

그림 3.1 2 DOF PID 제어시스템

Fig. 3.1 The 2 DOF PID control system

Collection

$$C_1(s) = K_p\left(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{1 + T_f s}\right) \tag{3.1a}$$

$$C_2(s) = -K_p\left(\alpha + \beta\frac{T_d s}{1 + T_f s}\right) \tag{3.1b}$$

식 (3.1)에서 K_p, T_i, T_d는 각각 비례이득, 적분시간, 미분시간을 의미하고, α와 β는 0과 1사이의 값을 갖는 상수이다. 한편 $T_f = T_d/N$는 필터 시정수이며, N은 최대미분이득(Maximum derivative gain)으로서 8~20 사이에서 경험적으로 정해지는 상수이다[1]. 많은 연구결과에서 $N = 10$을 사용하고 있으므로 본 논문에서도 이 값을 사용한다.

한편 2 DOF PID 제어기의 출력은 다음 식

$$U(s) = [C_1(s) + C_2(s)]R(s) - C_1(s)Y(s) \tag{3.2}$$

으로 표시되므로, 식 (2.9), 식 (3.1)과 식 (3.2)로부터 전체 제어 시스템은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$Y(s) = G_{yr}(s)R(s) + G_{yd}(s)D(s) \tag{3.3a}$$

$$G_{yr}(s) = \frac{P(s)[C_1(s) + C_2(s)]}{1 + P(s)C_1(s)} \tag{3.3b}$$

$$G_{yd}(s) = \frac{P'(s)}{1 + P(s)C_1(s)} \tag{3.3c}$$

이 식으로부터 계단상의 설정치 변경과 계단상의 외란 변경에 대해 식 (3.4)의

Collection

조건이 만족하는 한 $\lim_{s\to 0} G_{yr}(s) \to 1$, $\lim_{s\to 0} G_{yd}(s) \to 0$이 되어 각각의 정상상태 오차는 0이 된다.

$$\lim_{s\to 0} C_1(s) \to \infty \tag{3.4a}$$

$$\lim_{s\to 0} \frac{C_2(s)}{C_1(s)} \to 0 \tag{3.4b}$$

$$\lim_{s\to 0} P(s) \neq 0, \quad \lim_{s\to 0} \left| \frac{P'(s)}{P(s)} \right| < \infty \tag{3.4c}$$

한편 식 (3.3)에서 알 수 있듯이 출력은 설정치 응답과 외란 응답의 선형결합으로 되어 있고 또 $G_{yd}(s)$는 $C_1(s)$만의 함수이므로 $C_1(s)$를 먼저 동조한 다음 이 결과를 이용해서 $G_{yr}(s)$의 $C_2(s)$를 동조하는 것이 가능하다.

3.1.2 등가 2 DOF PID 제어기

식 (3.1)-(3.2)로 표시되는 2 DOF PID 제어기는 두 개의 미분요소를 가지는 구조로 되어 있어서 그대로 사용하면 해석이 복잡하게 되므로 이를 정리하면 식 (3.5)와 같이 하나의 미분요소를 갖도록 고쳐 쓸 수 있다.

$$U(s) = [K_p(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{1 + T_f s}) - K_p(\alpha + \beta \frac{T_d s}{1 + T_f s})]R(s)$$

$$- K_p(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{1 + T_f s})Y(s)$$

Collection

$$= K_p[(1-\alpha)R(s)-Y(s)]+\frac{K_pT_ds}{1+T_fs}[(1-\beta)R(s)-Y(s)]$$

$$+\frac{K_p}{T_is}[R(s)-Y(s)] \qquad (3.5)$$

그림 3.2는 이를 그린 등가 블록선도이다. 그림에서 만약 $\alpha = \beta = 0$이면 이는 표준형 PID 제어기가 되므로 표준형 PID 제어기는 2 DOF PID 제어기의 특별한 경우임을 알 수 있다.

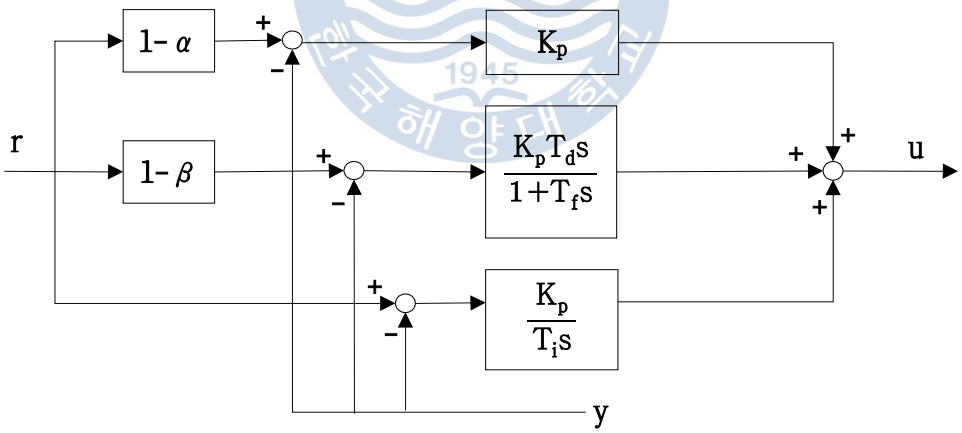

그림 3.2 등가 2 DOF PID 제어기

Fig. 3.2 Equivalent 2 DOF PID controller

Collection

3.2 적분기 안티와인드업

일반적으로 포화기를 가지는 제어시스템에서 설정치가 변경될 때 제어기의 출력이 포화기의 한계치(최대 또는 최소)에 도달하면 일정한 값으로 제한되어 이로 인해 출력에는 변동이 일어나지 않고 적분기에는 오차가 계속 누적되어 커지는 현상을 적분기 와인드업(Integrator windup)이라 한다. 적분기 와인드업이 일어나면 정작 출력이 설정치에 가까워졌을 때에는 제어입력이 작아져야함에도 불구하고 포화 동안에 누적된 값으로 말미암아 계속 큰 값이 출력되어 포화에서 벗어나는 데 상당한 시간이 소요되고, 결과적으로 오버슈트가 커지고 정정시간이 길어지게 된다.

적분기 와인드업에 대처할 수 있는 가장 직관적인 방법은 제어입력에 포화가 일어나지 않도록 하는 것이며, 크게 두 가지 방법이 제안되고 있다. 하나는 비선형제어기법으로 제어기를 설계하는 것으로서, 강력한 방법 중 하나이지만 실제 문제에 적용이 용이하지 못하다는 단점이 있다. 다른 하나는 적분 와인드업을 보상할 수 있는 부가적인 기능을 채용하는 방법인데, PID 제어기 사용 시 기존의 동조규칙들을 그대로 사용할 수 있는 장점이 있어 가장 선호된다. 여기에 해당되는 대표적인 방법으로는 Back Calculation이 있으며, 이는 제어기 출력과 포화기의 출력 차이를 피이드백해서 적분 동작을 수정하게 된다[10].

그림 3.3의 블록선도에서 볼 수 있듯이 본 논문에서 다루는 CSTR의 가열기는 제어기로부터 0~100[%] 사이의 입력을 받아 이에 비례하는 전력을 공급하기 때문에 비선형 포화기를 가지게 된다. 이 때문에 적분기 와인드업에 대한 대처 방법으로 Back Calculation법을 채용하며, 적분기 안티와인드업(Anti-windup)을 가지는 2 DOF PID 제어기의 구조는 그림 3.3과 같다.

그림에서 보면 적분기의 입력단에 제어입력의 포화값과 제어입력간의 차이($u_{sat} - u$)를 피이드백하게 되는데 포화가 일어나지 않으면(즉 $u = u_{sat}$ 이면) 정상적인 적분동작이 수행되고, 만약 포화가 일어나면($u \neq u_{sat}$) 적

Collection

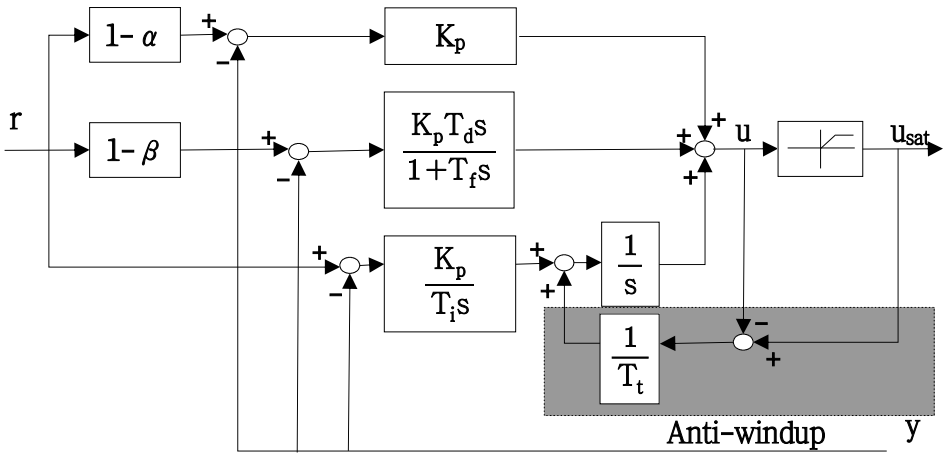

그림 3.3 안티와인드업을 가진 2 DOF PID 제어기

Fig. 3.3 2 DOF PID controller with anti-windup

분값이 감소되거나 증가하게 된다. 한편 T_t는 추종시간정수(Tracking time constant)이고 Bohn과 Atherton은 $T_t = T_i$를 제안하고 있으므로 본 논문에서도 이 값을 사용한다[10].

3.3 EA에 기초한 2 DOF PID 제어기의 동조

앞서 잠시 언급하였듯이 2 DOF PID 제어기의 동조 시 출력이 설정치 응답과 외란 응답의 선형결합형이고 또 $G_{yd}(s)$는 $C_1(s)$만의 함수이어서 먼저 $C_1(s)$를 동조한 다음 이 결과를 이용해서 $G_{yr}(s)$의 $C_2(s)$를 동조하는, 즉 독립적인 최적화를 통해 설정치 추종성능과 외란 억제성능을 동시에 만족시킬 수 있다고 보고 Araki와 Taguchi는 다음과 같은 절차를 제안

Collection

하고 있다[11].

> **Step 1**: Tune $\{K_p, T_i, T_d\}$ of $C_1(s)$ such that the disturbance response is optimized
>
> **Step 2**: With fixing $\{\widehat{K_p}, \widehat{T_i}, \widehat{T_d}\}$, tune $\{\alpha, \beta\}$ of $C_2(s)$ such that the set-point response is optimized

하지만 이 절차는 엄밀히 말해 $C_2(s)$의 최적화는 $C_1(s)$에 종속되기 때문에 전체 시스템의 관점에서 최적화라고 할 수 없고 또 현장에서 흔히 접할 수 있는 비선형 포화기와 적분기 와인드업 문제를 고려하지 않고 있다. 이점을 고려하여 본 논문에서는 적분기 안티와인드업을 가지는 그림 3.4의 전체 제어시스템에서 2 DOF PID 제어기의 파라미터 {K_p, T_i, T_d, α, β}를 동시에 최적 동조하는 문제를 다룬다.

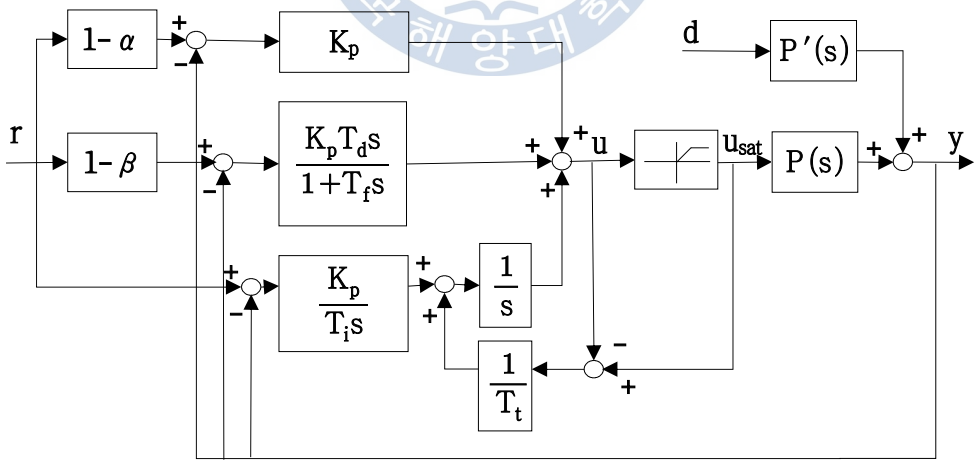

그림 3.4 안티와인드업을 가진 2 DOF PID 제어시스템

Fig. 3.4 2 DOF PID control system with anti-windup

Collection

본 논문에서 다루는 2 DOF PID 제어기는 대부분의 운전시간동안 외란 억제 성능이 개선되도록 사용되지만, 경우에 따라서는 설정치 변경 시 추종성능이 요구될 수 있으므로 외란 억제성능과 설정치 추종성능이 동시에 개선되도록 동조한다.

각 동작점에서 얻은 제어대상의 지역모델(Local model)을 기반으로 지역 제어기(Local controller)의 파리미터를 최적 동조하는 비선형 다변수 최적화 문제를 풀기 위해 그림 3.4의 설정치 r(t)와 외란 d(t)는 그림 3.5와 같이 계단상으로 변경하였다. 본 논문에서는 입력 유체의 온도 $T_{in}(t)$는 일정하게 유지되므로 $d(t) = w(t)$인 것으로 간주하였다.

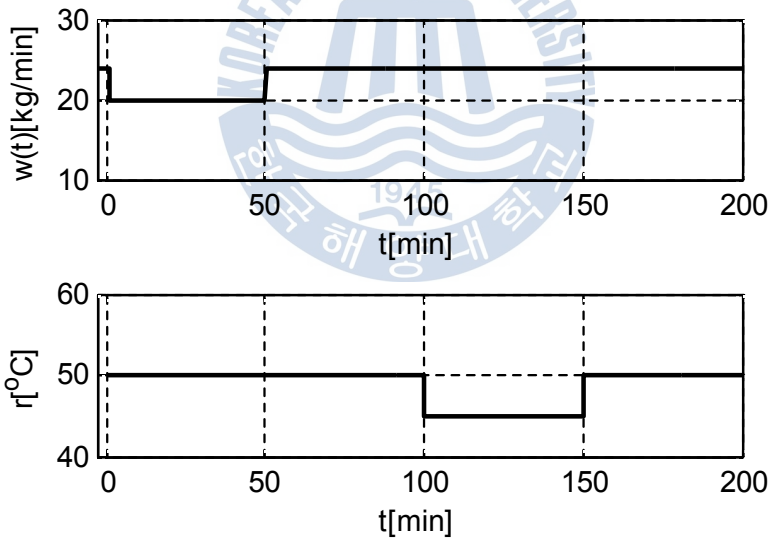

그림 3.5 제어기 파라미터 동조에 사용된 r(t)와 w(t)의 신호

Fig. 3.5 r(t) and w(t) signals used for controller parameter tuning

Collection

최적화 도구로는 EA를 사용하였고[12], 집단의 크기 $N=40$, Attractor의 매개변수로는 $\lambda=0.618$(황금비), $\omega=-0.3$, $n_{max}=20$, 동적 돌연변이의 매개변수로는 $P_m=0.05$, $b=4$를 사용하였고, PID 파라미터들은 구간 $0<K_p \leqq 20$, $0<T_i, T_d \leqq 1200$, $0 \leqq \alpha, \beta \leqq 1$ 에서 탐색되었다.

이 때 프로세스의 성능의 좋고 나쁨을 계량할 수 있는 평가함수로는 다음과 같은 절대오차적분(IAE)을 사용하였다.

$$J(\phi)=\int_0^{t_f} |r(t)-y(t)|\,dt \tag{3.5}$$

여기서 $\phi=[K_p, T_i, T_d, \alpha, \beta]^T \in R^5$는 제어기 파라미터로 구성된 벡터이고, r(t)는 설정치, y(t)는 출력이며, t_f는 적분시각으로서 이후의 적분값이 무시될 수 있도록 충분히 큰 값이다.

식 (3.5)으로 기술되는 최적화 성능지수의 해 ϕ는 다양한 기법을 사용하여 구할 수 있으나, 본 논문에서는 비선형 다변수 최적화 문제에 광범위하게 사용되는 EA를 사용한다.

3.4 퍼지 게인 스케쥴링

앞서 언급하였듯이 CSTR은 일일 생산량의 결정에 따라 어떤 동작점에서 운전되느냐에 따라 프로세스의 파라미터 변동이 크기 때문에 고정된 파라미터를 가지는 제어기로 전 구간에서 운전하면 성능이 떨어질 뿐 아니라, 경우에 따라서는 불안정하게 될 수 있다. 그림 3.6은 이에 대한 한 예를 보여준다. 그림은 $w(t)=24$[kg/min]에서 좋은 성능을 갖도록 동조한 2 DOF PID 제어기로 다른 동작점, 즉 $w(t)=20, 16, 12$[kg/min]에서 운전한 결과를 그린 것이다. $w(t)=16$[kg/min]영역에서는 성능이 좋지 않을 뿐만 아니라 $w(t)=12$[kg/min] 영역에서는 불안정한 특성을 보여준다.

Collection

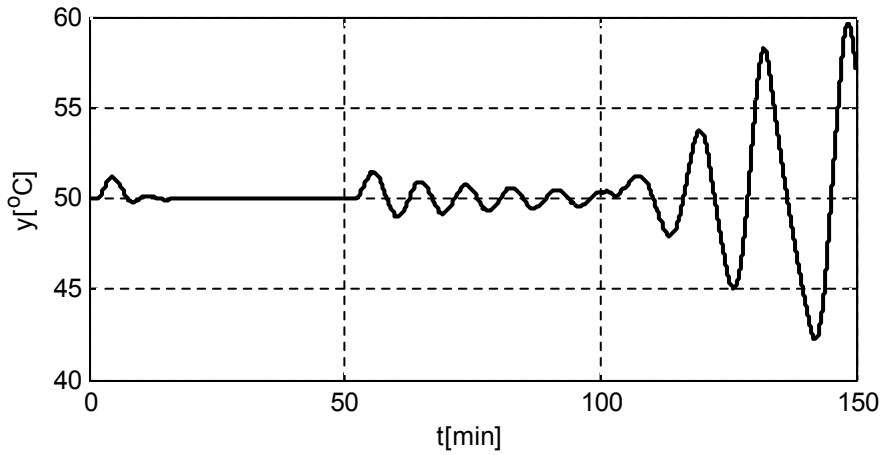

그림 3.6 w(t) = 24[kg/min]에서 동조된 고정 파라미터 2 DOF PID 제어기의 외란제거 응답

Fig. 3.6 Disturbance rejection response of the 2 DOF PID controller with fixed parameters tuned at w(t) = 24[kg/min]

따라서 전 영역에서 효과적으로 CSTR을 운전하기 위해서는 상황에 따라 2 DOF PID 제어기의 파라미터를 적절히 변경해주는 게인 스케쥴링이 필요하다. 각 동작점에서 얻은 지역모델을 통해 오프라인상에서 구한 지역제어기 파라미터를 저장하고 있다가 시스템의 동작점이 바뀌면 이를 스위칭해주는 스케쥴링 방법을 사용한다. 단순한 스위칭 방법은 스위칭 시 충격(스위칭 전후의 제어기 파라미터의 차이) 때문에 성능저하가 불가피하므로, 완만한 전환을 가능케 하는 퍼지 스케쥴링 기법을 이용한다.

앞서 입력 유체의 온도 $T_{in}(t)$는 일정한 것으로 간주하였기 때문에 스케쥴링 변수(Scheduling variable)는 유입되는 원료의 질량유량 w(t)이 되고, 퍼지분할에 사용된 퍼지집합은 F^1, F^2, F^3이며 이들은 각각 w(t)의 소

Collection

(Small), 중(Middle), 다(Large)를 의미한다. 이를 정의하기 위해서 식 (3.6)의 시그모이드와 벨 함수를 사용하였다.

$$F^j(x) = \frac{1}{1+e^{-a_j(x-c_j)}} \quad (j = 1, 3) \tag{3.6a}$$

$$F^2(x) = \frac{1}{1+|\frac{x-c_2}{a_2}|^{2b_2}} \tag{3.6b}$$

여기서 a_j, b_j와 $c_j (j = 1, 2, 3)$는 퍼지집합을 정의하기 위해 사용되는 파라미터들이고, 정의된 퍼지집합은 그림 3.7과 같다.

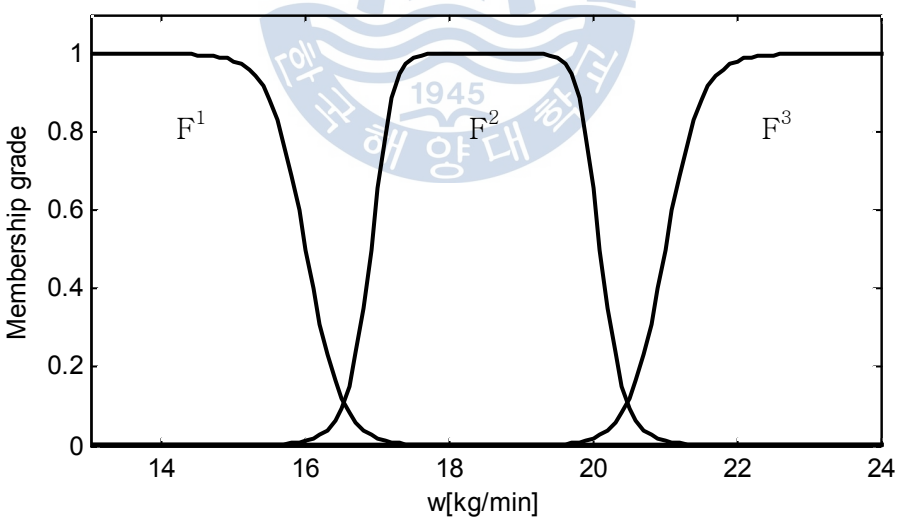

그림 3.7 스케쥴링 변수 w(t)의 퍼지 분할

Fig. 3.7 Fuzzy partitions of the scheduling variable w(t)

Collection

따라서 2 DOF PID 제어기의 파라미터들은 다음과 같이 Sugeno의 형태를 가지는 다수의 퍼지규칙으로부터 추론된다[13].

$$R^1 : \text{If } w(t) \text{ is } F^1, \text{ then } K_p = K_p^{\,1} \tag{3.7a}$$

$$R^2 : \text{If } w(t) \text{ is } F^2, \text{ then } K_p = K_p^{\,2} \tag{3.7b}$$

$$R^3 : \text{If } w(t) \text{ is } F^3, \text{ then } K_p = K_p^{\,3} \tag{3.7c}$$

여기서 R^j는 $j(j=1, 2, 3)$번째의 제어규칙, F^j는 j번째의 퍼지집합, 결론부의 K_p^j는 j번째의 동작점에서 최적 동조된 제어기의 파라미터를 뜻한다. 위 식을 퍼지추론하면 다음과 같은 최종 출력을 얻을 수 있다.

$$K_p = \frac{\sum_{j=1}^{3} \rho^j K_p^j}{\sum_{j=1}^{3} \rho^j} \tag{3.8}$$

여기서 $\rho^j = F^j[w(t)]$는 j번째 제어규칙의 기여도를 나타낸다.

나머지 4개의 제어기 파라미터들도 같은 방법으로 추론이 가능하며 다음 식으로 주어진다.

$$T_i = \frac{\sum_{j=1}^{3} \rho^j T_i^j}{\sum_{j=1}^{3} \rho^j} \tag{3.9}$$

$$T_d = \frac{\sum_{j=1}^{3} \rho^j T_d^j}{\sum_{j=1}^{3} \rho^j} \tag{3.10}$$

Collection

$$\alpha = \frac{\sum_{j=1}^{3} \rho^j \alpha^j}{\sum_{j=1}^{3} \rho^j} \tag{3.11}$$

$$\beta = \frac{\sum_{j=1}^{3} \rho^j \beta^j}{\sum_{j=1}^{3} \rho^j} \tag{3.12}$$

여기서 기여도 ρ^j는 식 (3.7)에 사용한 것과 같은 값을 가진다.

그림 3.8은 퍼지 게인 스케줄링을 채용한 전체시스템을 보여주는 블록 선도이다.

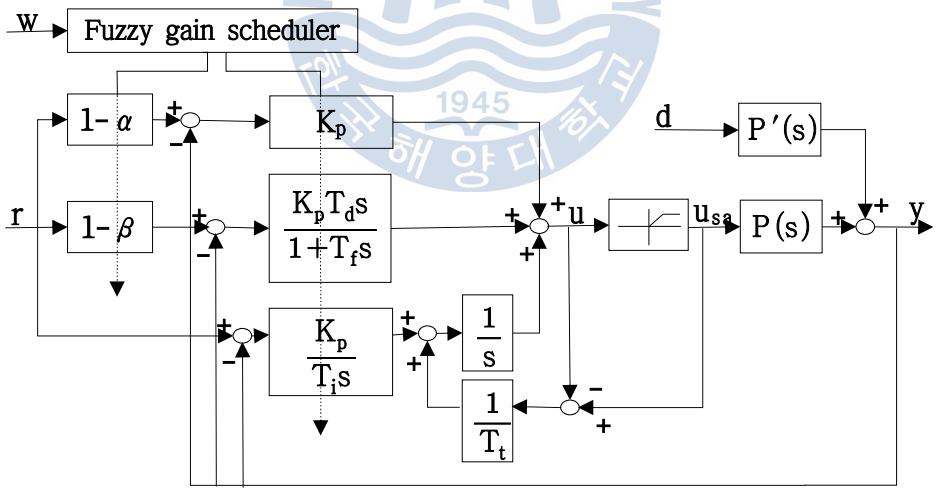

그림 3.8 퍼지 게인 스케줄러를 갖는 전체 제어시스템

Fig. 3.8 Overall control system with a fuzzy gain scheduler

Collection

제 4 장 모의실험 및 결과 검토

4.1 CSTR의 파라미터

본 논문에서 제안된 기법의 유효성을 검증하기 위하여 모의실험을 수행하고 다른 방법과 비교하였다. 모의실험에 사용된 CSTR의 파라미터들은 표 4.1과 같다.

표 4.1 시뮬레이션 데이터

Table 4.1 Data for simulation

Parameter	Unit	Value	Remarks
Density ρ	kg/m^3	1,000	
Specific heat capacity c	J/kgK	4,200	
Liquid volume V	m^3	0.2	
Constant K_h	w/%	800	
Constant K_s	kg	40	
Inlet temperature T_{in}	K	293	20[℃]
Mass flow w	kg/s	12/60～24/60	
Saturation limits	%	0～100	

Collection

4.2 지역모델과 지역제어기 동조

CSTR의 w(t)는 제품의 하루 생산계획에 따라 12~24[kg/min] 범위 내에서 변경될 수 있지만, 주로 세 가지 동작점 16, 20, 24[kg/min]에서 장시간 운전되는 것으로 간주하였다. 따라서 세 가지 동작점에서의 프로세스 파라미터는 식 (2.9c)로부터 계산되고 계산된 파라미터들은 표 4.2에 주어진다.

표 4.2 세 가지 동작점에서의 프로세스 파라미터

Table 4.2 Process parameters at three operating points

w(t)	Plant parameters			Remarks
	K	τ	L	
16	0.714	750	150	T_{in}= 20[℃] y= 50[℃]
20	0.571	600	120	
24	0.476	500	100	

여기서 얻은 지역모델을 근간으로 제안된 2 DOF PID 제어기와 Z-N[14], IMC[15] 및 Cvejn[16]의 1 DOF PID 제어기와 비교하였다. 비교의 공정성을 유지하기 위하여 다른 방법들도 각 동작점에서 지역 제어기를 동조하고 본 방법에서 사용한 안티와인드업 기법과 퍼지 게인 스케쥴링을 같이 적용한 후 응답을 비교하였다. 지역모델에 기초로 하여 계산된 지역제어기 파라미터들은 표 4.3에 나타내었다.

Collection

표 4.3 세 가지 동작점에서 동조된 제어기 파라미터

Table 4.3 Controller parameters tuned at three operating points

w(t)	Tuning method	Controller parameters				
		K_p^j	T_i^j	T_d^j	α^j	β^j
16	**Proposed**	**7.210**	**393.017**	**70.480**	**0.266**	**0.228**
	Z-N	8.400	300.000	75.000		
	IMC	5.133	825.000	68.182		
	Cvejn	5.600	800.000	46.875	tracking	
		6.055	387.652	43.353	disturbance	
20	**Proposed**	**9.427**	**295.770**	**55.263**	**0.310**	**0.156**
	Z-N	10.500	240.000	60.000		
	IMC	6.417	660.000	54.545		
	Cvejn	7.000	640.000	37.500	tracking	
		7.569	302.921	34.682	disturbance	
24	**Proposed**	**11.604**	**247.262**	**44.122**	**0.332**	**0.090**
	Z-N	12.600	200.000	50.000		
	IMC	7.700	550.000	45.455		
	Cvejn	8.400	533.333	31.250	tracking	
		9.083	252.434	28.902	disturbance	

그림 4.1은 본 논문에서 제안한 퍼지 게인 스케쥴링에 의해 각 동작영역에 따라 파라미터 값이 유연하게 변경됨을 그림으로 나타낸 것이다. 동작영역이 변경되는 천이구간에 있어서도 파라미터 값이 비선형적으로 잘 보간됨으로써 자연스러운 제어파라미터를 변경시키는 기능을 갖고 있음을 확인할 수 있다.

Collection

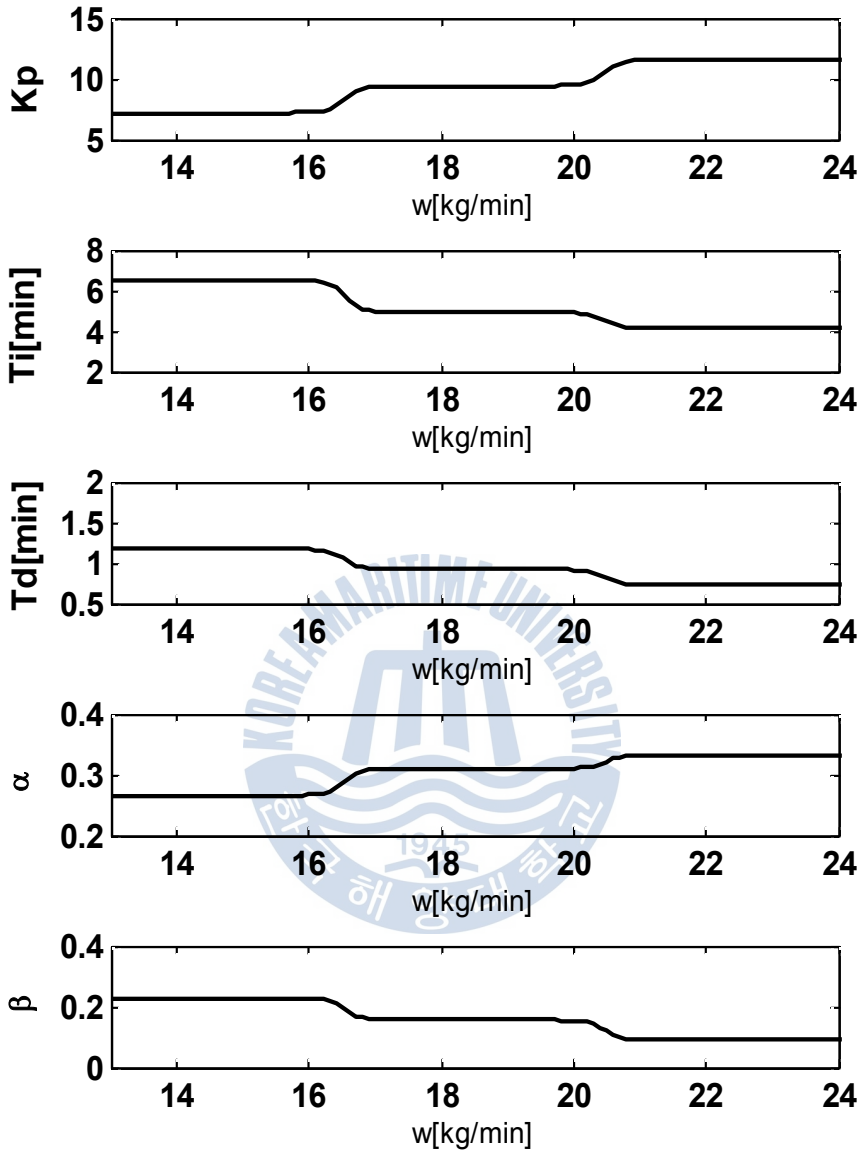

그림 4.1 퍼지 게인 스케쥴링을 위한 퍼지시스템의 입출력 관계

Fig. 4.1 I/O relationship of the fuzzy system for fuzzy gain scheduling

Collection

4.3 외란 억제성능

CSTR의 설정치 r은 대부분의 운전시간동안 일정한 값으로 설정(본 논문에서는 50[℃])되고, 그날의 생산량의 증가 또는 감소 결정에 따라 w(t)가 변경되는 방식으로 운전된다. 따라서 제어기의 역할은 외란의 변동에도 불구하고 생산물의 출구 측 온도를 일정하게 유지해주는 것이므로, 외란 억제성능을 적절히 계량하기 위하여 설정치 $r = 50[℃]$로 고정하고, $w(t) = 24[kg/min]$에서 프로세스가 정상상태에 있을 때 그림 4.2와 같이 $t = 50, 100, 150[min]$에서 각각 $w(t) = 20, 16, 12[kg/min]$로 계단상으로 변경시키는 실험을 실시하였다. 이 때 입력되는 원료의 온도 T_{in}은 20[℃]인 것으로 가정하였다.

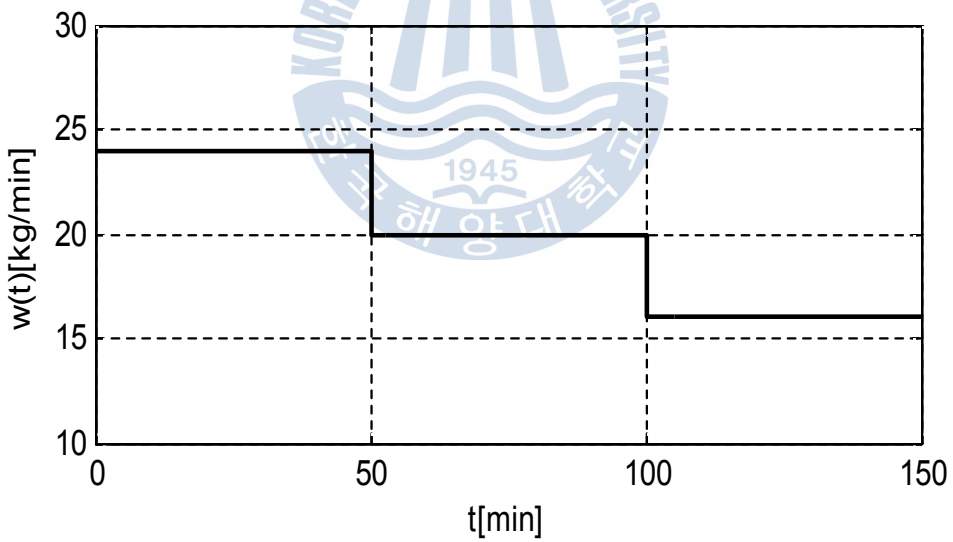

그림 4.2 w(t)의 계단상 변화

Fig. 4.2 Step changes of w(t)

Collection

그림 4.3은 이때의 출구 측 온도 y와 제어입력 u의 응답을 나타낸 것이다. 전 동작구간에서 보면 제안한 방법의 성능이 기존의 방법보다 우수함을 알 수 있다. 다른 방법들은 응답의 최고치(Perturbance peak) y_{max}도 클 뿐 아니라 외란의 영향이 소멸되는 회복시간(Recovery time) t_{rcy}도 길다. 특히 Z-N법과 Cvejn법은 w(t)가 작을 때(이 때 제어대상의 K, τ, L이 커짐) 진동 현상이 커지게 되는 것을 볼 수 있다.

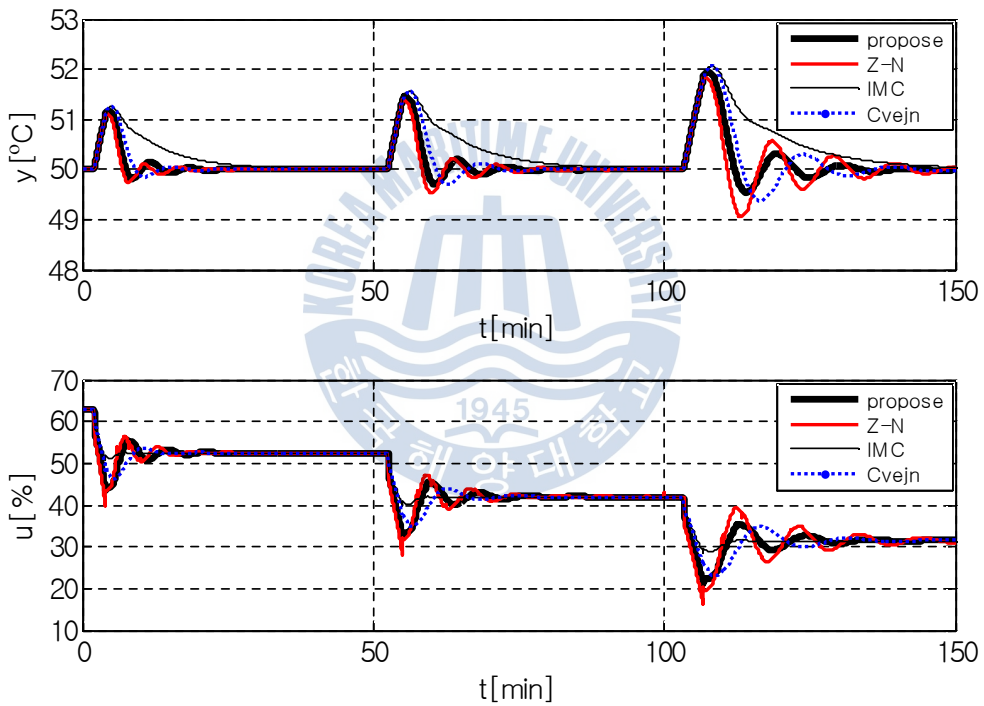

그림 4.3 w(t)를 24[kg/min]에서 12[kg/min]로 계단상 감소시킬 때 외란 억제응답

Fig. 4.3 Disturbance rejection responses when w(t) is step-wisely decreased from 24[kg/min] to 12[kg/min]

Collection

표 4.4는 그림 4.3의 시뮬레이션 결과를 정량적으로 살펴보기 위해 응답의 최고치(y_{max})와 이때의 시각(t_p)과 응답의 회복시간(t_{rcy})을 구한 것이다. 여기서 t_{rcy}은 출력이 설정치 값의 2[%] 범위 내에 도달하는데 걸리는 시간을 의미한다.

표 4.4 w(t)를 24[kg/min]에서 12[kg/min]로 계단상으로 감소시킬 때 프로세스 성능

Table 4.4 Process performance when w(t) is step-wisely decreased from 24[kg/min] to 12[kg/min]

w(t)[kg/min]	Tuning Method	Performance		
		y_{max}[℃]	t_p[min]	t_{rcy}[min]
24 → 20	**Proposed**	**51.18**	**4.58**	**19.42**
	Z-N	51.12	4.32	20.16
	IMC	51.25	5.12	36.05
	Cvejn	51.27	5.02	17.13
20 → 16	**Proposed**	**51.46**	**5.67**	**24.34**
	Z-N	51.39	5.38	29.58
	IMC	51.56	6.33	42.29
	Cvejn	51.57	6.22	25.46
16 → 12	**Proposed**	**51.94**	**7.55**	**37.52**
	Z-N	51.85	7.13	50이상
	IMC	52.06	8.32	50이상
	Cvejn	52.08	8.18	41.17

표에서 보면 w(t)가 작을수록 응답의 최고치가 커지며, 이 때의 시간이 길어지고, 회복시간이 길어지는 경향이 있음을 알 수 있다. 특히 Z-N, IMC방법의 경우 w(t)가 16[kg/min]에서 12[kg/min]으로 변경될 때의 회복시간이 50분 이상으로 제안한 방법에 비해 많이 느려짐을 알 수 있으며, 제안한 방법이 전체적으로 다른 방법들보다 나은 성능을 보여 주고 있다.

Collection

한편 CSTR의 파라미터들은 w(t)에 직접 영향을 받기 때문에 w(t)가 감소할 때와 증가할 때의 값들이 서로 다르게 되므로, 그림 4.4는 반대로 w(t)＝12[kg/min]에서 프로세스가 정상상태에 있을 때 그림 4.2와 유사한 패턴으로 w(t)를 계단상으로 증가시키면서 실험을 실시하고 나타낸 응답이다.

이 경우에는 Z-N법의 응답이 다른 방법보다 약간 좋지만, 본 방법의 응답도 만족스럽다는 것을 알 수 있다. 앞의 표 4.4와 같이 각 방법의 성능을 정량적으로 비교하기 위해 요약한 것이 표 4.5이다. 여기서 y_{min}은 응답의 최저치를 의미한다.

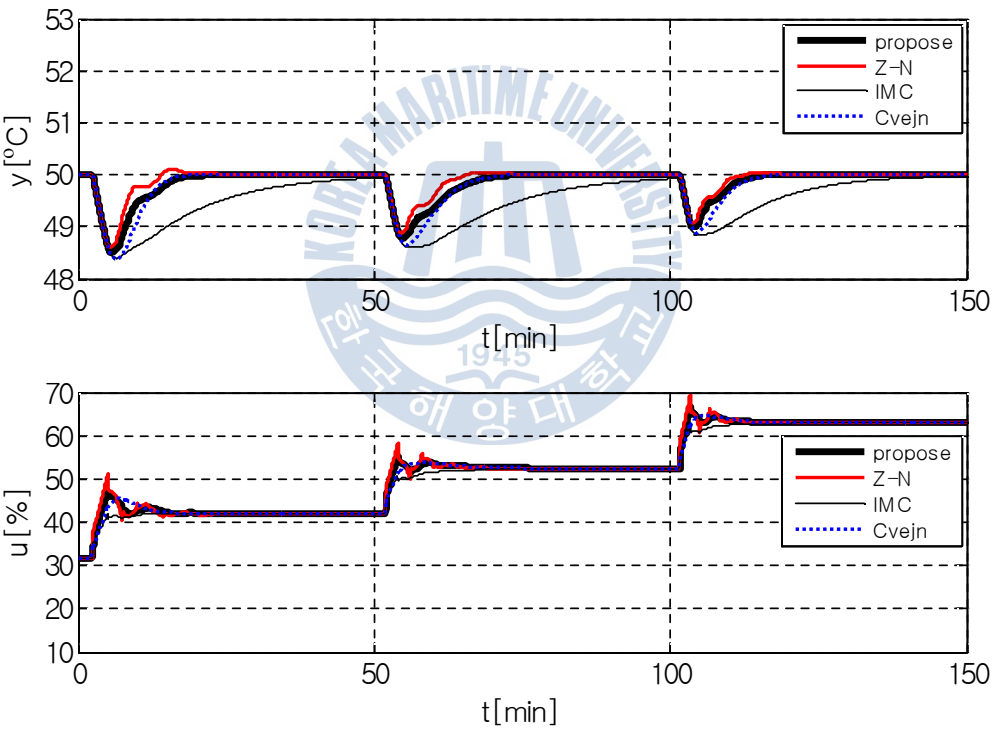

그림 4.4 w(t)가 계단상으로 12[kg/min]에서 24[kg/min]로 증가할 때 외란 억제응답

Fig. 4.4 Disturbance rejection responses when w(t) is step-wisely increased from 12[kg/min] to 24[kg/min]

Collection

표 4.5 w(t)가 계단상으로 12[kg/min]에서 24[kg/min]로 증가할 때 프로세스 성능

Table 4.5 Process performance when w(t) is step-wisely increased from 12[kg/min] to 24[kg/min]

w(t)[kg/min]	Tuning Method	Performance		
		y_{min}[℃]	t_p[min]	t_{rcy}[min]
12 → 16	**Proposed**	**48.51**	**5.90**	**19.57**
	Z-N	48.60	5.48	23.27
	IMC	48.39	6.70	50이상
	Cvejn	48.37	6.55	17.32
16 → 20	**Proposed**	**48.78**	**4.90**	**21.51**
	Z-N	48.87	4.50	23.24
	IMC	48.61	5.72	50이상
	Cvejn	48.65	5.55	20.88
20 → 24	**Proposed**	**48.99**	**4.02**	**15.24**
	Z-N	49.06	3.73	18.82
	IMC	48.83	4.68	50이상
	Cvejn	48.88	4.57	16.22

4.4 설정치 추종성능

다음은 CSTR의 출구 측 온도, 즉 생산물의 온도를 변경하는 경우를 고려하여 설정치 추종성능을 얻는 실험을 실시하였다. 이를 위해 프로세스가 r = 50[℃], w(t) = 24[kg/min]에서 운전되고 있을 때 그림 4.5와 같이 t = 0[min]에서 r을 45[℃]로 계단상으로 낮추고 다시 t = 40[min]에서 50[℃]로 높이었다.

Collection

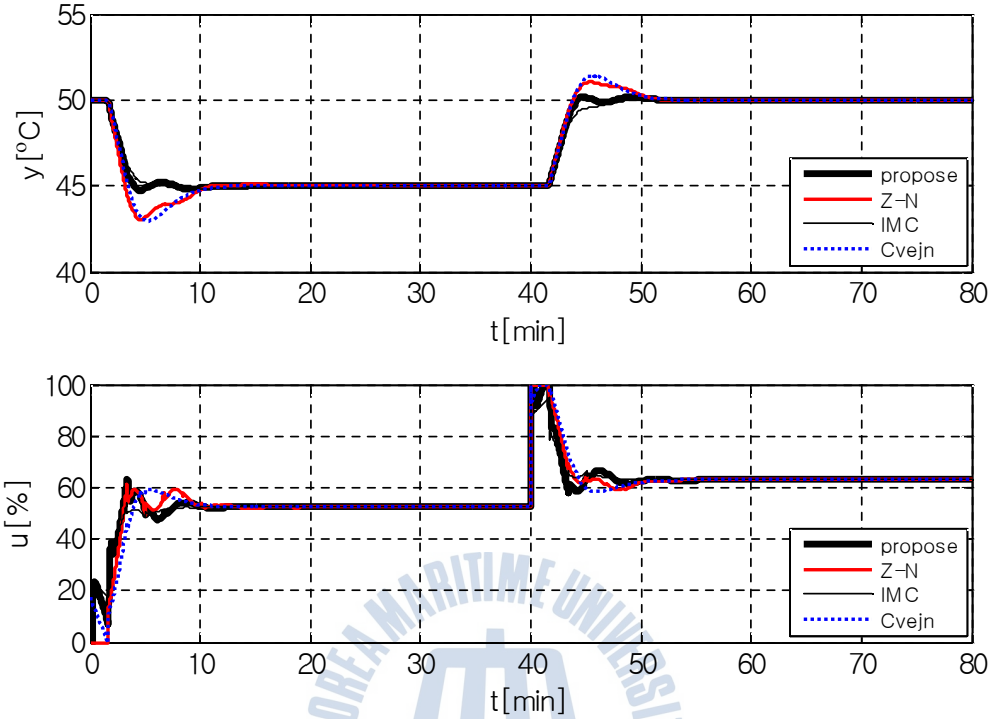

그림 4.5 $w(t)=24[kg/min]$일 때 설정치 추종응답

Fig. 4.5 Set-point tracking responses when $w(t)=24[kg/min]$

그림에서 알 수 있듯이 모든 응답들이 시간이 진행됨에 따라 진동이 줄어들고 설정치에 접근함을 알 수 있고 특히 제안한 방법이 IMC법과 같이 오버슈트, 상승시간, 정정시간 등에서 다른 두 방법보다 우수한 성능을 보이고 있음을 알 수 있다.

표4.6은 그림 4.5의 시뮬레이션 결과를 정량적으로 살펴보기 위해 오버슈트(M_p), 상승시간(t_r)과 2[%] 정정시간(t_s)을 구한 것이다. 여기서 $t_r = t_{90} - t_{10}$이고, t_{10}과 t_{90}은 각각 출력이 설정치의 10[%], 90[%]에 도달하는데 걸리는 시간을 의미한다.

Collection

표 4.6 w(t)＝24[kg/min]일 때의 프로세스 성능

Table 4.6 Process performance when w(t)＝24[kg/min]

r(t)[℃]	Tuning Method	Performance		
		M_p[%]	t_r[min]	t_s[min]
50 → 45	**Proposed**	**5.99**	**1.69**	**10.41**
	Z-N	38.95	1.21	10.53
	IMC	3.81	2.22	16.94
	Cvejn	40.79	1.40	11.36
45 → 50	**Proposed**	**3.77**	**1.91**	**10.56**
	Z-N	20.84	1.69	11.09
	IMC	0.14	3.15	8.06
	Cvejn	28.48	1.70	11.44

표를 살펴보면 제안한 방법이 IMC법과 같이 오버슈트가 적고, 상승시간이 빠른 편에 속하며, 정정시간에서는 다른 방법보다 우수한 성능을 보이고 있음을 알 수 있다.

한편 그림 4.6은 r＝50[℃], w(t)＝16[kg/min]에서 프로세스가 정상상태에 있을 때 t＝0[min]에서 r을 45[℃]로 다시 t＝40[min]에서 50[℃]로 계단상으로 변경하였을 경우 제어시스템의 출력과 제어입력을 나타낸 것이다.

Collection

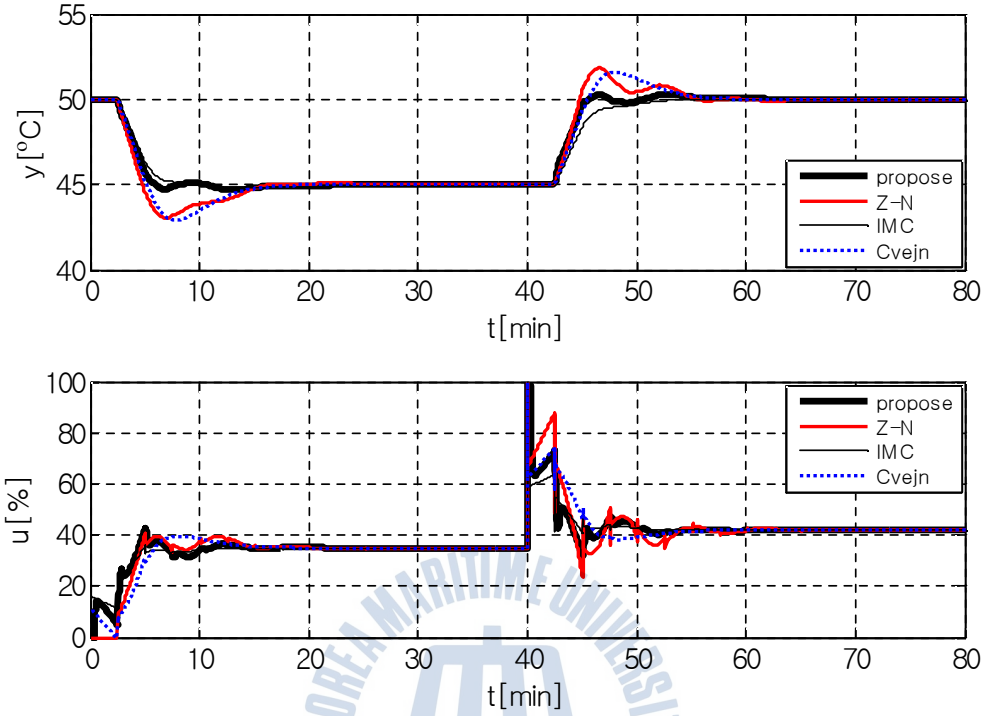

그림 4.6 w(t)＝16[kg/min]일 때 설정치 추종응답

Fig. 4.6 Set-point tracking responses when w(t)＝16[kg/min]

w(t)가 감소하면 프로세스의 파라미터들이 증가하여 제어가 어려운 데도 불구하고 그림에서 확인할 수 있듯이 제안한 방법은 다른 방법보다 우수한 성능을 보이고 있음을 알 수 있다.

표 4.7은 그림 4.6의 시뮬레이션 결과를 정량적으로 살펴보기 위해 과도응답 성능을 구하여 비교한 것이다.

Collection

표 4.7 w(t)＝16[kg/min]일 때의 프로세스 성능

Table 4.7 Process performance when w(t)＝16[kg/min]

y(t)[℃]	Tuning Method	Performance		
		M_p[%]	t_r[min]	t_s[min]
50 → 45	**Proposed**	**5.81**	**2.46**	**16.10**
	Z-N	39.19	1.82	15.74
	IMC	3.90	3.29	25.45
	Cvejn	41.18	2.09	16.86
45 → 50	**Proposed**	**5.78**	**2.26**	**15.68**
	Z-N	36.81	1.83	15.14
	IMC	0.11	4.71	12.08
	Cvejn	31.73	2.31	16.56

4.5 잡음 억제성능

이미 3장에서 언급하였듯이 본 논문에서는 미분폭주 현상에 대처하기 위해 이상적인 미분동작에 1차형의 필터를 추가한 2 DOF PID 제어기를 다루어 왔다. 제안한 제어기의 잡음 억제성능을 알아보기 위해 측정 센서에 평균이 0이고 분산이 0.05^2인 정규분포 백색잡음(White gaussian noise), 즉 N(0, 0.05^2)이 유입되는 것으로 간주하고 시뮬레이션을 실시하였다. 시

Collection

뮬레이션을 위해 그림 4.2에서 사용하였던 것과 같은 제어 환경을 가정하였고 w(t)를 계단상으로 변경시키는 동안 잡음을 인가하였다. 그림 4.7은 4가지 방법으로부터 구한 출력응답을, 그림 4.8은 본 방법과 Z-N 방법의 제어입력을 구하여 그린 것이다.

그림 4.7에서 보면 미리 예견할 수 있었듯이 제안된 방법은 필터의 역할로 인해 잡음의 영향을 적게 받지만, 이상적인 미분동작을 채용하는 나머지 세 가지 방법은 크게 영향을 받아 응답이 왜곡되고 있음을 확인할 수 있다.

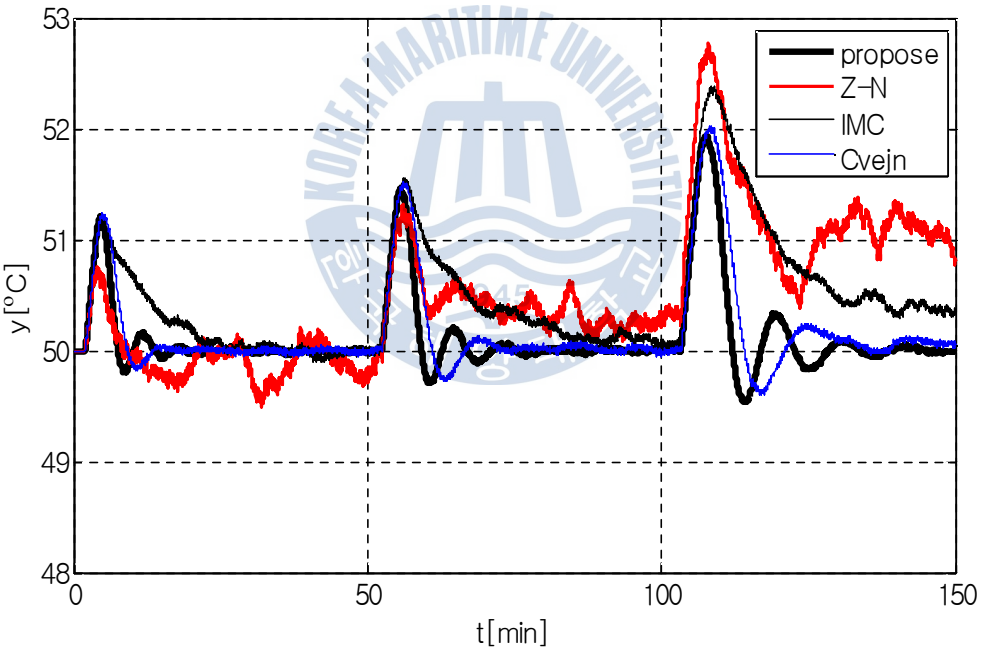

그림 4.7 잡음환경 하에 w(t)를 계단상으로 감소시킬 때의 외란 억제응답

Fig. 4.7 Disturbance rejection responses when w(t) is step-wisely decreased under noise environment

Collection

특히 제어입력을 비교한 그림 4.8에서 보면 제안한 방법의 u(t)는 제한된 범위 내에서 동작하지만, Z-N 방법의 u(t)는 전력변환기의 최소, 최대치를 오가며 급격하게 변하고 있고 이는 전력변화기 하드웨어에 부담으로 작용하게 된다. 나머지 두 방법의 u(t)도 Z-N 방법과 유사한 결과를 보여주고 있음을 확인할 수 있었다.

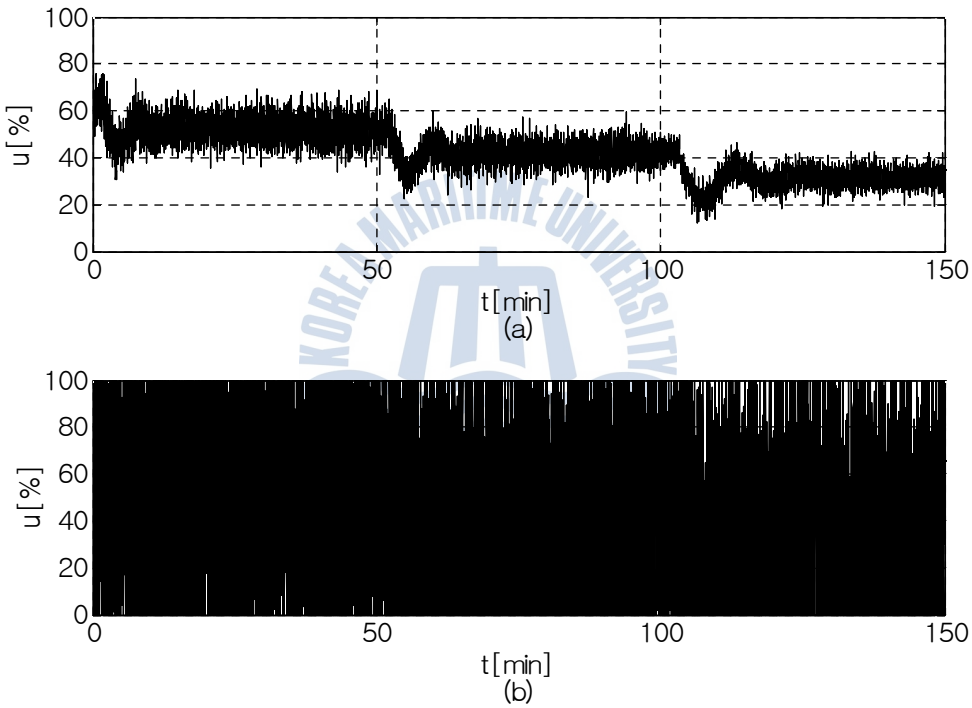

그림 4.8 잡음환경 하에 w(t)를 계단상으로 감소시킬 때의 제어입력
(a) 제안한 방법 (b) Z-N 방법

Fig. 4.8 Control input when w(t) is step-wisely decreased under noise environment
(a) Proposed method (b) Z-N method

Collection

제 5 장 결론

본 논문에서는 2 DOF PID 제어기와 퍼지 게인 스케쥴링에 기초하여 CSTR 프로세스의 온도를 제어하는 문제를 다루었다. 기존의 1 DOF PID 제어기의 한계성을 보완하기 위해 2 DOF PID 제어기를 사용하였고, 포화기로부터 일어날 수 있는 적분기 와인드업 문제를 극복하기 위해 적분기 안티와인드업 기법을 채용하였다. 또한 CSTR는 동작영역에서 얻은 지역 모델과 EA를 이용해 시스템을 구성하고 지역 2 DOF PID 제어기를 최적 동조하여 퍼지 게인 스케쥴러로 스위칭하였다. 본 논문에서 제안된 방법으로 CSTR의 온도제어에 적용시켜 실험을 수행한 결과 실험으로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 외란억제성능에 대해서는 응답의 최고치(y_{max})가 낮고, 이 때의 시각(t_p)이 빠르며, 응답의 회복시간(y_{rcy})이 빠를 경우 외란억제성능이 좋다고 볼 수 있는데 본 논문에서 제안하는 방법은 기존의 방법들보다 전체적으로 우수한 성능을 보여줌을 확인하였다.

(2) 설정치 추종성능에 대해서는 응답의 오버슈트(M_p)가 적고, 상승시간(t_r)이 빠르며, 정정시간(t_s)이 빠를 경우 설정치 추종성능이 좋다고 볼 수 있는데 본 논문에서 제안하는 방법은 오버슈트(M_p), 상승시간(t_r), 정정시간(t_s)이 다른 기존의 방법에 비해서 전체적으로 안정된 성능을 보여줌을 확인하였다.

(3) 잡음억제성능의 경우 기존의 세 가지 방법들은 이상적인 미분동작에 의해 잡음의 영향을 크게 받아 출력의 응답이 왜곡되었지만, 제안된 방법은 필터의 역할로 인해 잡음의 영향을 적게 받았다. 또한 잡음환

Collection

경에 대한 제어입력을 나타내었을 경우 다른 세 가지 방법은 전력변환기의 최소, 최대치를 오가며 급격하게 변동되었으나, 본 논문에서 제안한 방법은 제한된 범위 내에서 비교적 안정적으로 동작하였다.

결론적으로, 본 논문에서 제안한 퍼지 게인 스케쥴링에 기초한 2자유도 PID 제어기는 일일 생산량 w(t)의 변동에도 불구하고 출구온도를 일정하게 유지하는 제어기로서 충분히 사용 가능함을 확인할 수 있었다.

Collection

참고문헌

[1] K. J. Astrom and T. Hagglund, *PID Controllers: theory, design and tuning*, ISA Press, 1995.

[2] W. L. Luyben, *Chemical reactor design and control*, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2007.

[3] T. Pan, S. Li, and W.J. Cai, "Lazy Learning-Based Online Identification and Adaptive PID Control: A Case Study for CSTR Process", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 46, pp. 472-480, 2007.

[4] M. Nikravesh, A. E. Farell, and T. G. Stanford, "Control of Nonisothermal CSTR with Time Varying Parameters via Dynamic Neural Network Control(DNNC)", *Chemical Engineering Journal*, Vol. 76, No. 1, pp. 1-16, 2000.

[5] R. Vinodha, S. A. Lincoln, and J. Prakash, "Multiple Model and Neural Based Adaptive Multi-loop PID Controller for a CSTR Process", *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, Vol. 5, No. 4, pp. 251-256, 2010.

[6] S. Engell and K. -U. Klatt, "Nonlinear Control of a Non-Minimum-Phase CSTR", *American Control Conference*, pp. 2941-2945, 1993.

[7] U. S. Banu and G. Uma, "Fuzzy Gain Scheduled CSTR with GA-Based PID", *Chemical Engineering Communications*, Vol. 195, No. 10, pp. 1213-1226, 2008.

[8] M. F. Rahmat, A. M. Yazdani, M. A. Movahed, and S. Mahmoudzadeh, " Temperature Control of a Continuous Stirred Tank Reactor by Means of Two Different Intelligent Strategies", *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, Vol. 4,

Collection

No. 2, pp. 244-267, 2011.

[9] I. M. Horowitz, *Syntthesis of Feedback Systems*, Academic Press, 1963.

[10] C. Bohn and D. P. Atherton, "An Analysis Package Comparing PID Anti-windup Strategies", *IEEE Systems Magazine*, Vol. 15, No. 2, pp. 34-40, 1995.

[11] M. Araki and H. Taguchi, "Two-Degree-of-Freedom PID Controllers", *International Journal of Control*, Automation, and Systems, Vol. 1, No. 4, pp. 401-411, 2003.

[12] G. Jin and T. Tran, "A Nature-inspired Evolutionary Algorithm Based on Spiral Movements", *Proceedings of the SICE Annual Conference*, Taiwan, pp. 1643-1647, 2010.

[13] T. Takagi and M. Sugeno, "Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control," *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics Society*, Vol. 15, No. 1, pp. 116-132, 1985.

[14] J. G. Ziegler and N. B. Nichols, "Optimum Settings for Automatic Controllers", *Transactions of the ASME*, Vol. 64, pp. 759-768, 1942.

[15] D. E. Rivera, M. Morari, and S. Skogestad, "Internal Model Control: PID Controller Design", *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, Vol. 25, No. 1, pp. 252-265, 1986.

[16] J. Cvejn, "PI/PID Controller Design for FOPDT Plants Based on the Modulus Optimum Criterion", *Proceedings of the 18th International Conference on Process Control*, Slovakia, pp. 301-306, 2011.

Collection