

工學碩士 學位論文

RCGA를 이용한 PID 제어기의
모델기반 동조규칙

Model-based Tuning Rules of the PID Controller
Using Real-coded Genetic Algorithms

指導教授 陳 康 奎

2003年 2月

韓國海洋大學校 大學院

制 御 計 測 工 學 科

金 到 應

本 論文을 金到應의 工學碩士 學位論文으로 認准함

委員長 工學博士 金 鍾 和 印

委 員 工學博士 劉 永 昊 印

委 員 工學博士 陳 康 奎 印

2002年 12月 21日

韓國海洋大學校 大學院

목차

Abstract	iii
제 1 장 서론	1
제 2 장 PID 제어기와 동조규칙	3
2.1 PID 제어기	3
2.2 기존의 동조규칙	5
2.2.1 Ziegler-Nichols(Z-N) 동조법	5
2.2.2 Cohen-Coon(C-C) 동조법	9
2.2.3 IMC 동조법	10
2.2.4 Lopez ITAE(L-ITAE) 동조법	11
제 3 장 RCGA를 이용한 최적 동조규칙	13
3.1 PID 제어시스템의 무차원화	13
3.1.1 제어기 및 제어대상	13
3.1.2 제어기 및 제어대상의 무차원화	14
3.2 유전알고리즘을 이용한 최적동조	16
3.2.1 최적화 도구로서의 RCGA	16
3.2.2 성능지수	17
3.2.3 최적 PID 계수집합	19
3.3 제안한 동조규칙	22

제 4 장 시뮬레이션 및 결과검토	26
4.1 예제 1	26
4.1.1 모델의 근사화	26
4.1.2 PI 제어기의 응답비교	29
4.1.3 PID 제어기의 응답비교	32
4.2 예제 2	34
4.2.1 모델의 근사화	34
4.2.2 PI 제어기의 응답비교	36
4.2.3 PID 제어기의 응답비교	39
4.3 예제 3	41
4.3.1 모델의 근사화	41
4.3.2 PI 제어기의 응답비교	43
4.3.3 PID 제어기의 응답비교	46
 제 5 장 결론	 48
 참고문헌	 49

Model-based Tuning Rules of the PID Controller Using Real-coded Genetic Algorithms

Do-Eung Kim

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

Abstract

Over 60 years, the proportional-integral-derivative(PID) controller has been especially popular in industrial processes, such as chemical, petroleum, power and manufacturing industries due to its simple structure and robustness. Since the performance of the PID controller depends highly on its three parameters, the proper tuning of the parameters is required to guarantee acceptable control performance. Therefore, a number of tuning methods, such as the Ziegler-Nichols methods, the Cohen-Coon method, and the IMC method have been proposed. These conventional tuning methods are based on experience and experiment.

In this thesis, a method for obtaining model-based tuning rules for the PID controller are proposed incorporating with real-coded genetic algorithms. First, the optimal parameter sets for step set-point tracking are obtained based on the first-order time delay model and a real-coded genetic algorithm as an optimization tool. As for assessing

the performance of the controller, performance indices (IAE, ISE and ITAE) are adopted. Then, tuning rules are derived using the tuned parameter sets, potential rule models and another real-coded genetic algorithm.

A set of simulation works are carried out to verify the effectiveness of the proposed rules.

제 1 장 서론

근래 제어분야의 이론과 기술 발전에 많은 진전이 있어왔음에도 불구하고 아직도 PID 제어가 산업공정을 비롯한 석유, 화학, 발전 분야에서 폭 넓게 이용되고 있다[1]. 이것은 구조가 단순하여 하드웨어적으로 실현하기가 쉽고 동조할 파라미터가 적어 다루기가 용이하기 때문이다. PID 제어기의 설계에서 성능을 결정짓는 중요한 요소는 비례이득(K_p), 적분시간(τ_i), 미분시간(τ_d)인데, 주어진 설계사양을 만족하도록 이들을 적절히 선택하는 것을 동조(tuning)라 한다.

PID 제어기의 동조에는 여러 방식이 적용될 수 있으나 경험적이고 실험적인 접근법이 보편적이다. 대표적인 것으로는 Ziegler와 Nichols(Z-N)의 개루프 동조법과 폐루프 동조법[2]이 있고, Cohen-Coon(C-C) 동조법[3] 등이 있다. 이와 같은 고전적인 방법들은 실제 시스템 응답이 외란이나 잡음에 대해 민감하여 정확한 매개변수를 결정하기 어렵고, Z-N의 폐루프법은 시스템의 안정성이 중시되는 한 적용하기 어려운 문제점이 있다.

이런 문제점을 보완하면서 불확실한 시스템의 PID 제어기의 파라미터를 결정하는 방법으로는 릴레이 개환입력에 대한 응답을 이용하는 방법[4]이 있고, 초기 파라미터의 실시간 적응동조 방법[5], 패턴을 이용한 전문가 동조법[6], 모델기반 동조법[7-10] 등이 있다. 최근에는 진화적 기법을 이용하여 오프라인적으로 최적의 파라미터를 구하고자 하는 연구가 진행되고 있다. Wang과 Kwok은 단순 유전알고리즘(Simple genetic algorithm: SGA)을 이용하여 pH를 중성화하는 프로세스에서 PID제어를 최적 동조하는 문제를 다루었다[7]. 여기서 그들은 유전알고리즘으로 설계된 PID 제어시스템의 성능이 Z-N 동조법과 Hooke-Jeeves 패턴 탐색법으로 조정된 PID 제어시스템보다 비교하여 더 개선될 수 있음을 보

였다.

따라서, 본 연구에서도 모델과 실수코딩 유전알고리즘(Real-coded genetic algorithm: RCGA)[15]을 이용하여 산업용 과감쇠 시스템(Over-damped system)에 적합한 새로운 PID 동조규칙을 얻는 문제를 다룬다. 산업현장의 복잡한 프로세스들은 비록 고차일지라도 1차 시간지연 모델과 유사한 응답특성을 가지므로 프로세스 응답으로부터 모델의 매개변수를 얻을 수 있다. 따라서 먼저 1차 시간지연 모델을 기반으로 계단상의 설정치 변화에 최적의 추종성능을 주는 PID 제어기의 계수 집합(Parameter set)을 얻는다. 계수들은 세 성능지수(ISE, IAE, ITAE)를 최소화하는 관점에서 결정되고, 여기서 발생하는 최적화 문제는 RCGA로 해결한다. 다음 계수 집합과, 동조규칙의 모델 및 RCGA를 이용하여 동조규칙이 유도된다. 제안된 동조규칙의 성능을 확인하기 위하여 시뮬레이션을 실시하며, Z-N법, C-C법, IMC법과 Lopez ITAE법과 성능을 비교한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 제 2장에는 PID 제어기와 기존의 동조규칙들을 개괄적으로 소개하고, 제 3장에는 RCGA를 이용한 새로운 동조규칙을 제안하고, 제 4장에서는 시뮬레이션을 통하여 기존의 동조규칙과 제안한 동조규칙의 응답을 비교하여 제안한 동조규칙의 유효성을 밝히며, 마지막으로 제 5장에서는 결론을 제시한다.

제 2 장 PID 제어기와 동조규칙

PID 제어기의 동조규칙을 제안하기에 앞서 이 장에서는 PID 제어기와 기존의 몇 가지 동조법에 대해 살펴본다

2.1 PID 제어기

산업현장에서 자주 이용되는 PID 제어시스템은 PID 제어기와 제어대상으로 구성되며, 그림 2.1과 같이 주어진다.

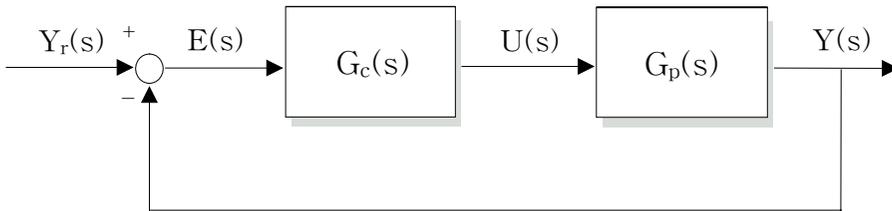


그림 2.1 PID 제어시스템의 블록선도

Fig. 2.1 Block diagram of the PID control system

PID 제어기로는 주로 비례제어(Proportional control), 적분제어(Integral control), 미분제어(Derivative control)의 병렬결합 형태로 구현되는 표준형이 사용되며, 그 전달함수는 식 (2.1)과 같이 표시된다.

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right) \quad (2.1)$$

여기서 K_p 는 비례이득(Proportional gain), τ_i 는 적분시간(Integral time), τ_d 는 미분시간(Derivative time)을 의미한다.

입출력 관계식으로 이를 다시 표시하면

$$U(s) = U_1(s) + U_2(s) + U_3(s) \quad (2.2)$$

$$= K_p E(s) + \frac{K_p}{\tau_i s} E(s) + K_p \tau_d s E(s) \quad (2.3)$$

와 같고 $U_1(s)$ 는 비례제어, $U_2(s)$ 는 적분제어, $U_3(s)$ 는 미분제어를 의미한다. 그림 2.2는 PID 제어기의 구조를 보여준다.

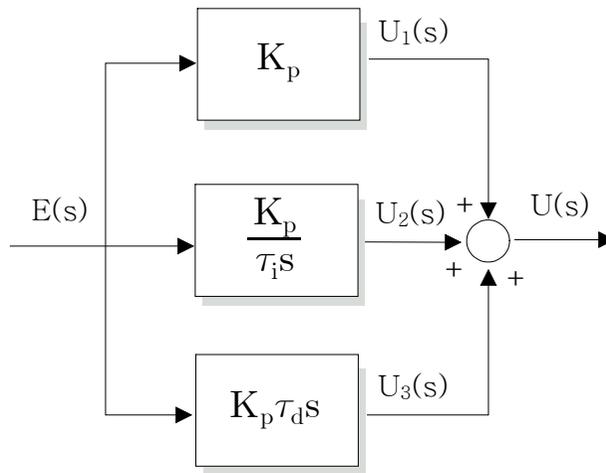


그림 2.2 PID 제어기의 구조

Fig. 2.2 Structure of the PID controller

비례제어는 기본적인 제어동작으로서 오차에 대하여 그에 비례하는 양으로 제어출력을 만드는 것으로 일반적으로 비례계수가 커질수록 시스템 응답을 빠르게 하는 특징을 가지지만 경우에 따라 정상상태 오차

(Steady-state error)를 제거할 수 없는 단점을 가지게 된다.

적분제어는 저주파 이득을 크게 하여 정상상태 오차를 제거해주기 위하여 사용되는데, 계수를 잘못 조정하면 과도응답이 나빠지는 단점이 있다. 대개 단독으로 쓰이지 않으며 일반적으로 비례제어와 같이 쓰여 PI 제어기의 구조를 이룬다.

미분제어는 차단 주파수 부근에서 위상여유를 늘리고 제동 효과를 높여 줌으로써 오버슈트(Overshoot)를 줄이고 과도응답을 개선할 수 있다. 또한, 오차를 예상하고, 미리 수정동작을 취하며, 시스템의 안정도를 증가시킨다. 그러나 계측신호에 잡음이 내포될 경우에는 잡음에 민감하게 반응하여 오동작을 일으킬 가능성이 커지는 단점이 있으며, 오차의 변화율에 따라 작동하기 때문에 비례제어와 같이 쓰여 PD 제어기, 비례-적분 제어와 같이 쓰여 PID 제어기의 구조를 이룬다.

이러한 PID 제어기의 최적 설계는 제어환경에 따라 설정치 변경에 대한 시스템의 추종성능(Tracking performance)을 개선하거나 아니면 외란에 대한 외란제거 성능(Disturbance rejection performance)이 만족스럽도록 그 계수를 최적으로 조정하는 문제로 귀착된다.

2.2 기존의 동조규칙

2.2.1. Ziegler-Nichols(Z-N) 동조법

1942년 Ziegler와 Nichols는 PID 제어기의 동조문제를 연구하면서 개루프법(과도응답법)과 폐루프법(한계감도법)[2]을 제안하였다. 이 방법들은 변수 모델로 공정을 특성화하지 않는 장점 때문에 일반적으로 가장 널리 쓰이고 있는 방법이다.

가. 페루프 동조법

Ziegler와 Nichols는 비례제어만으로 페루프 제어시스템을 구성하여 일정한 진폭으로 진동하게 하고 여기서 한계주기와 한계이득을 얻어 PID 제어기의 파라미터를 조정하는 페루프 동조법을 제안하였다. 페루프법을 개략적으로 소개하면 다음과 같다.

단계 1: 그림 2.3과 같이 비례제어만을 갖는 페루프 제어시스템을 구성한다.

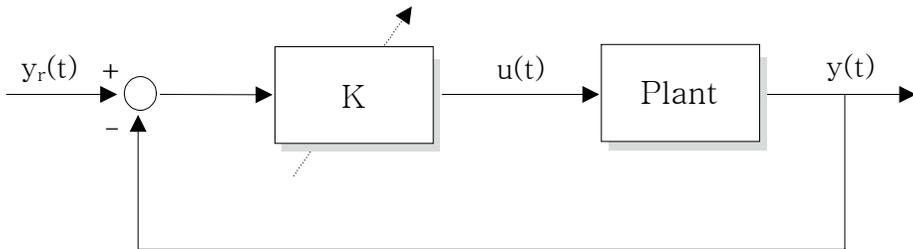


그림 2.3 비례제어만을 갖는 페루프 제어시스템

Fig. 2.3 Closed-loop control system with proportional control

단계 2: 출력 $y(t)$ 가 한계진동 할 때까지 비례계수를 증가시킨다. 한계진동이 일어날 때의 비례계수 K 를 한계이득 K_u 라 한다.

단계 3: 그림 2.4와 같은 응답곡선으로부터 한계주기 T_u 를 구한다.

단계 4: 표 2.1과 같이 K_u , T_u 로부터 PID 계수를 구한다.

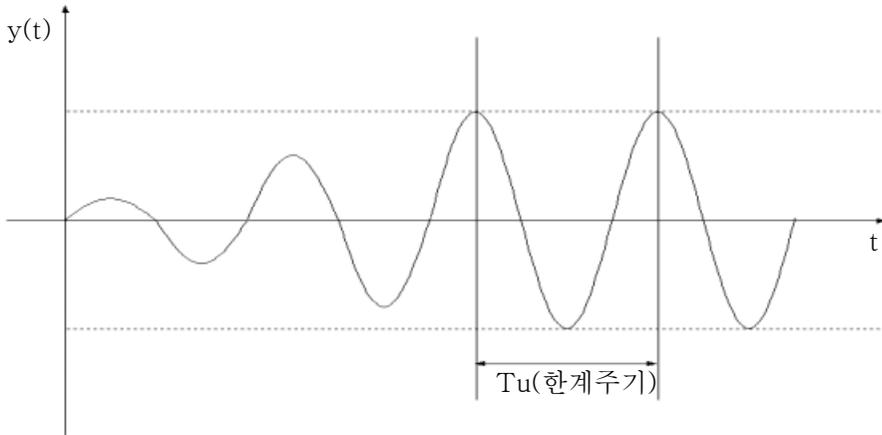


그림 2.4 응답곡선과 한계주기

Fig. 2.4 Reaction curve and ultimate period

표 2.1 Z-N 페루프 동조규칙

Table 2.1 Z-N closed-loop tuning rules

Parameter Controller	K_p	τ_i	τ_d
PI	$0.45K_u$	$0.83T_u$	
PID	$0.6K_u$	$0.5T_u$	$0.125T_u$

그러나 페루프법은 공정 이득의 안정도를 유지하는 수준에서 제어해야 하고, 운전중인 시스템으로부터 한계이득과 한계주기를 얻는 것이 위험할 경우에는 적용하기가 어렵다.

나. 개루프 동조법

Z-N의 개루프 동조법은 제어대상을 식 (2.4)와 같은 1차 시간지연 시

스텝(과감쇠 시스템)인 것으로 간주하면서 시작한다. 개루프법은 제어대상의 개루프 응답으로부터 매개변수를 얻고, 이로부터 PID 계수를 조정한다.

$$G_p(s) = \frac{Ke^{-Ls}}{1 + \tau s} \quad (2.4)$$

여기서 K는 정상이득(Gain)이고 τ 는 시정수(Time constant)이며, L은 시간지연(Time delay)이다. 개루프법을 개략적으로 소개하면 다음과 같다.

단계 1: 개루프 제어시스템의 단위계단 입력에 대한 응답곡선(출력응답)을 구한다.

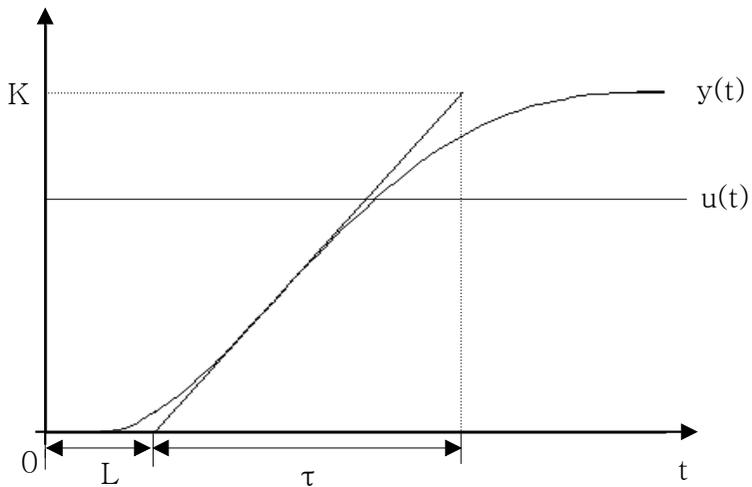


그림 2.5 단위계단 입력에 대한 응답곡선
Fig. 2.5 Reaction curve for unit step input

단계 2: 그림 2.5의 응답곡선으로부터 정상상태에서의 크기를 K 로 하고, 기울기가 가장 큰 변곡점에서 접선을 그어서 시간 축과 접선의 교차점을 찾아내고, 이들 값으로부터 도형적으로 L , τ 를 결정한다. 시간 축과 접선의 교차점에서 L 을 측정하고, 그리고 기울기가 가장 큰 시점과 교차점 사이의 간격을 τ 로 한다.

단계 3: 이 방법에 의한 제어기의 계수 값은 표 2.2와 같다.

표 2.2 Z-N 개루프 동조규칙
Table 2.2 Z-N open-loop tuning rules

Parameter Controller	K_p	τ_i	τ_d
PI	$0.9 \frac{\tau}{KL}$	3.3L	
PID	$1.2 \frac{\tau}{KL}$	2.0L	0.5L

그러나 개루프 동조법은 실험 응답곡선으로부터 정확한 K , τ , L 를 구하기 위해서는 상당한 현장경험이 요구된다.

2.2.2 Cohen-Coon(C-C) 동조법

기존의 Z-N 동조법 대한 개선 연구로 Cohen과 Coon에 의해 시간지연 항이 포함된 일차 시스템으로 근사하는 개루프 반응곡선 방법[3]이 제시되었다. 이 방법은 대상 플랜트로부터 일차 시간지연 근사 모델을 찾아내는 방법은 Z-N의 개루프 동조법과 같고 이 모델로부터 최적의 PID 계수를 동조하게 된다.

응답곡선을 통해서 세 매개변수를 구하면 PID 계수는 표 2.3과 같이 동조한다.

표 2.3 Cohen-Coon 동조규칙

Table 2.3 C-C tuning rules

Parameter Controller	K_p	τ_i	τ_d
PI	$\frac{\tau}{KL} (0.9 + \frac{1}{12} \frac{L}{\tau})$	$L \frac{30 + 3 \frac{L}{\tau}}{9 + 20 \frac{L}{\tau}}$	
PID	$\frac{\tau}{KL} (\frac{4}{3} + \frac{1}{4} \frac{L}{\tau})$	$L \frac{32 + 6 \frac{L}{\tau}}{13 + 8 \frac{L}{\tau}}$	$L \frac{4}{11 + 2 \frac{L}{\tau}}$

2.2.3 IMC 동조법

Morari와 Zafiriou는 폐루프 내에 공칭모델을 포함하여 플랜트와 모델간의 오차를 제한하여 새로운 제어입력을 만드는 내부 모델제어(Internal model control: IMC)[9]를 제안하였다. IMC는 플랜트를 1차 시간지연 모델로 모델링 한 다음 이 모델을 제어기 구조 내에 플랜트와 병렬로 삽입하고, 필터와 제어기를 플랜트와 직렬로 연결하는 구조를 가지고 있다. 제어기는 최적 시스템 반응의 성질을 가지도록 설계되며, 필터는 견실성을 제공하기 위해서 사용된다. 이와 같이 설계된 IMC의 구조를 PID 제어기의 구조로 바꾸면 PID 계수를 동조할 수 있다. 제어기의 이득은 원하는 폐회로 시정수와 같은 λ 값의 변화에 따라 활발하거나 또는 변화가 적은 제어입력을 만들도록 선택할 수 있다. 이 방법은 플랜트와 모델간의 모델링 오차를 보상할 수 있는 유용한 방법이지만, 사용되는 모델은 일반적으

로 플랜트보다 저차이며 플랜트의 불안정한 성분을 포함해야 한다는 제한 조건이 있다. 표 2.4는 IMC 동조법을 나타낸 것이다.

표 2.4 IMC 동조규칙
Table 2.4 IMC tuning rules

Parameter Controller	K_p	τ_i	τ_d
PI	$\frac{2\tau + L}{2\lambda K}$	$\tau + \frac{L}{2}$	
PID	$\frac{2\tau + L}{2K(\lambda + L)}$	$\tau + \frac{L}{2}$	$\frac{\tau L}{(2\tau + L)}$

여기서 λ 는 필터에 포함되는 계수로서 IMC를 통한 제어기 설계방식에 사용되는 설계변수이며, PI 제어기의 경우 $\lambda \geq 1.7L$ 을, PID 제어기의 경우 $\lambda \geq 0.25L$ 을 사용한다. 만약, 너무 작은 λ 를 사용하게 되면 응답은 빨라 지나 진동하거나 불안정해질 수 있다.

2.2.4 Lopez ITAE(L-ITAE) 동조법

Lopez 등[8]은 식 (2.4)의 1차 시간지연 모델에 대해 “시간곱 절대오차 적분(ITAE)”의 성능지수를 최소로 하도록 제어기의 계수를 결정하는 방법을 제안하였다.

$$ITAE = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (2.5)$$

L-ITAE 동조법은 ITAE 성능지수와 최소자승법으로 PID 계수 집합을

구한다. 설정치 추종과 외란제거 목적의 두 동조법이 제안되었다. 설정치 추종 목적의 ITAE 동조법은 계단상의 설정치 입력에 대하여 빠른 응답을 보여주나, 계단상의 외란에 대하여 응답이 좋지 못하며, 외란제거 목적의 ITAE 동조법은 계단상의 외란에 대하여 최적의 응답결과를 보여준다. 표 2.5는 설정치 추종 목적의 ITAE 동조법이다.

표 2.5 L-ITAE 동조규칙
Table 2.5 L-ITAE tuning rules

Parameter Controller	K_p	τ_i	τ_d
PI	$\frac{0.586}{K} \left(\frac{\tau}{L}\right)^{0.196}$	$\frac{\tau}{1.030 - 0.165 \left(\frac{L}{\tau}\right)}$	
PID	$\frac{0.965}{K} \left(\frac{\tau}{L}\right)^{0.850}$	$\frac{\tau}{0.769 - 0.1465 \left(\frac{L}{\tau}\right)}$	$0.308 \left(\frac{L}{\tau}\right)^{0.929}$

제 3 장 RCGA를 이용한 최적 동조규칙

이 장에서는 플랜트 모델과 유전알고리즘을 기반으로 계단상의 설정치 변화에 최적의 추종성능을 주는 새로운 PID 동조규칙을 얻는다. 세 가지 성능지수에 대해 유전알고리즘으로 최적의 PID 계수 집합을 얻고 이를 동조규칙 모델과 결합하여 동조규칙을 얻는다.

3.1 PID 제어시스템의 무차원화

3.1.1 제어기 및 제어대상

앞에서 잠시 언급하였듯이 본 연구의 최종 목적은 산업현장의 과감쇠 프로세스(Over-damped process)를 대상으로 한 PID 동조법을 얻는 것이므로, 제어기로는 식 (2.1)과 같이 비례, 적분, 미분 제어의 병렬결합으로 표시되는 표준형의 PID 제어기를 채용하며, 제어대상은 식 (3.1)과 같은 1차 시간지연 시스템으로 가정하였다.

$$G_p(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{Ke^{-Ls}}{1 + \tau s} \quad (3.1)$$

여기서 K 는 정상이득, τ 는 시정수, L 은 시간지연을 의미한다.

식 (3.1)의 모델을 선택한 이유는 고차의 모델을 이용하면 약간의 성능 개선은 가능하지만 반대로 제어기 설계가 복잡해지고, 대부분의 산업현장 프로세스들은 식 (3.1)의 모델과 유사한 응답특성을 가지며, 세 매개변수

K, τ , L을 적절히 조정함으로써 고차의 프로세스를 이와 같은 모델로 근사화 할 수 있기 때문이다.

3.1.2 제어기 및 제어대상의 무차원화

식 (3.1)의 제어대상은 세 개의 파라미터를 가지고 있다. 만약 시간 t를 시정수 τ 로 나누어 무차원화 하면 L과 τ 를 하나의 파라미터(즉, L/ τ)로 취급할 수 있어서 해석이 용이하게 된다. 어떤 시간함수의 라플라스 변환(Laplace transformation)식으로부터 $\frac{t}{\tau} = t'$ 로 치환하면 주파수 영역에서는 $s' = \tau s$ 의 관계가 성립하므로, $s = s'/\tau$ 로 치환하면 PID 제어기와 제어대상의 무차원 전달함수는 식 (3.2), 식 (3.3)과 같이 고쳐 쓸 수 있다.

PID 제어기:

$$\begin{aligned} G_c(s') &= G_c(s) \Big|_{s=s'/\tau} \\ &= K_p \left[1 + \frac{1}{\frac{\tau_i}{\tau} s'} + \frac{\tau_d}{\tau} s' \right] \end{aligned} \quad (3.2)$$

제어대상:

$$\begin{aligned} G_p(s') &= G_p(s) \Big|_{s=s'/\tau} \\ &= \frac{Ke^{-\frac{L}{\tau} s'}}{1 + s'} \end{aligned} \quad (3.3)$$

이들을 라플라스 역변환하여 시간영역으로 변환하면 각각 다음과 같이 표시된다.

PID 제어기:

$$u(t') = K_p \left[e(t') + \frac{\tau}{\tau_i} \int e(t') dt' + \frac{\tau_d}{\tau} \frac{de(t')}{dt'} \right] \quad (3.4)$$

제어대상:

$$\dot{y}(t') + y(t') = K u \left(t' - \frac{L}{\tau} \right) \quad (3.5)$$

그림 3.1은 무차원 PID 제어시스템의 블록선도를 보여주며, 전체 전달 함수는 다음 식으로 표시된다.

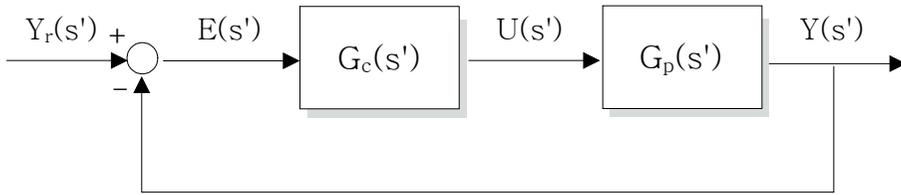


그림 3.1 무차원 PID 제어시스템의 블록선도

Fig 3.1 Block diagram of the dimensionless PID control system

$$\frac{Y(s')}{Y_r(s')} = \frac{G_c(s')G_p(s')}{1 + G_c(s')G_p(s')} \quad (3.6)$$

$$= \frac{KK_p \left(\frac{\tau_d}{\tau} s'^2 + s' + \frac{\tau}{\tau_i} \right) e^{-\frac{L}{\tau} s'}}{s'^2 + s' + KK_p \left(\frac{\tau_d}{\tau} s'^2 + s' + \frac{\tau}{\tau_i} \right) e^{-\frac{L}{\tau} s'}} \quad (3.7)$$

3.2 유전알고리즘을 이용한 최적동조

여기서는 무차원 모델과 유전알고리즘을 이용하여 PID 제어기의 계수를 최적으로 동조하는 문제를 다룬다. 유전알고리즘은 동조과정에서 일어나는 비선형 최적화 문제의 해를 얻는 도구로 사용된다.

3.2.1 최적화 도구로서의 RCGA

주어진 제어대상과 성능지수(Performance index)에 대해 성능지수 값을 최소로 하는 PID 계수를 조정하는 일련의 작업은 비선형 최적화 문제를 야기한다. 이러한 문제를 실제환경에 적용할 경우에는 잡음, 외란, 모델링 오차 등으로 인하여 탐색공간은 다봉이 되고 대단히 복잡한 양상을 띠게 된다. 여기에 구배(Gradient)에 기초한 기존의 방법들을 사용하면 전역해(Global solution)를 얻는데 어려움을 겪게 되므로 본 논문에서는 최근 최적화 도구로 광범위하게 이용되고 있는 유전알고리즘(Genetic algorithm: GA)을 사용한다[14].

GA는 자연선택과 유전학에 기초한 탐색 알고리즘으로서 구배에 기초한 탐색 알고리즘과는 달리 연속성, 미분가능성, 단봉성과 같은 탐색공간에 대한 부가정보를 요구하지 않고, 목적함수 외의 어떤 보조정보도 요구하지 않으며, 매우 복잡하고 규모가 큰 탐색공간에서도 원만히 동작하고, 다봉의 특성을 가지는 탐색환경에서도 전역해에 수렴하는 특징이 있다.

GA의 탐색 과정은 크게 초기화, 적합도 평가, 재생산, 교배, 돌연변이의 5단계로 구분된다. 초기화 단계에서는 주어진 문제의 해가 될 가능성이 있는 개체들의 집합인 집단이 형성된다. 다음 단계에서 개체들은 복호화되어 목적함수를 제공하고 이로부터 적합도가 계산된다. 적합도는 자연계에서의 환경과 같은 역할을 수행한다. 개체들의 상대적인 적합도 값에 따라 현재 집단 내의 개체들이 재생산을 위해 선택된다. 성능이 좋은 개체

들은 더 많이 선택되어 복제되고 반면에 성능이 나쁜 개체들은 집단으로부터 소멸되게 된다. 선택된 개체들은 교배를 통해 재결합되는데 서로 간에 유전정보를 교환함으로써 집단에 새로운 개체를 도입하게 된다. 돌연변이는 선택된 개체의 유전정보를 임의로 변경하여 집단에 새로운 정보를 도입하는 수단을 제공한다. 이렇게 해서 새롭게 형성된 집단은 다시 평가되고 최적의 해가 발견될 때까지 앞서 수행한 일련의 연산 과정은 반복된다.

초기 유전알고리즘은 이진 형태의 염색체를 사용해왔기 때문에 아직도 이진코딩이 폭 넓게 채용되고 있다. 이진코딩을 채용할 때 정밀도를 높이거나 해에 대한 사전지식의 결여로 탐색구간을 확대하면 염색체 길이가 길어진다. 긴 염색체는 매우 큰 탐색공간을 만들어 GA가 해를 찾는데 많은 시간을 요구하거나, 경우에 따라서는 실패하는 원인을 제공한다.

따라서 본 논문에서는 실수코딩 염색체를 채용하는 실수코딩 유전알고리즘(Real-coded genetic algorithm: RCGA)[15]을 이용한다. 실수코딩을 사용함으로써 염색체는 계수들의 벡터 결합, 즉 $\mathbf{s} = (K_p \ \tau_i)$ 또는 $\mathbf{s} = (K_p \ \tau_i \ \tau_d)$ 로 표현된다.

3.2.2 성능지수

집단이 진화해 가는 동안 RCGA는 개체간의 우열을 평가하기 위하여 적합도를 필요로 하게 되는데 적합도는 성능지수(목적함수)로부터 계산된다. 시스템의 성능이 좋고 나쁨을 정량적으로 평가할 수 있는 성능지수로 는 시간곱 절대오차 적분(Integral of the time-weighted absolute error: ITAE), 제곱오차적분(Integral of the square error: ISE), 절대오차적분(Integral of the absolute error: IAE) 등이 있다. 본 논문에서는 아래의 세 가지 성능지수를 동시에 고려하였다.

$$\text{ISE: } J = \int_0^{t_f} e^2(t) dt \quad (3.8)$$

$$\text{IAE: } J = \int_0^{t_f} |e(t)| dt \quad (3.9)$$

$$\text{ITAE: } J = \int_0^{t_f} t |e(t)| dt \quad (3.10)$$

여기서 시간 t_f 는 이 이후의 오차가 무시되어도 좋을 정도로 충분히 큰 값이다.

일반적으로 ISE는 해석이 용이하여 최적제어기 설계 등에 자주 이용되나 오차가 클 때는 큰 벌점을, 작을 때는 작은 벌점을 주는 결과를 초래해 최적해 부근에서 계수의 변화에 둔감하다. 한편 IAE는 오차의 절대 크기를 취함으로써 양이나 음의 오차에 균등한 벌점을 부여하는 효과를 주므로 ISE보다 나은 감도를 나타낸다. ITAE는 장시간의 과도 현상에 대해 벌점을 주는 매우 유용한 기준으로 IAE나 ISE보다 훨씬 더 변별력이 있으며, 이 적분의 최소값은 시스템의 파라미터들이 변하는 경우에 훨씬 더 잘 정의될 수 있다.

한편 최소화 문제를 최대화 문제로 전환하기 위하여 다음과 같은 적합도 함수가 사용된다.

$$f = -J + \gamma \quad (f > 0) \quad (3.11)$$

여기서 γ 는 좋은 개체와 더 나은 개체의 구별이 용이하도록 세대마다 적절히 변경되는 매개 변수로서, 부적절하게 선정되면 탐색효율을 저하시킨다[14]. 흔히 탐색공간 내에서 목적함수의 최소값을 사전에 알 수 없으므로 γ 는 경험에 의해 충분히 작은 값으로 선정된다. 그러나 세대 진행과

무관하게 항상 고정하게 되면 선택압(Selection pressure)이 떨어지기 때문에 이를 보완해줄 스케일링 윈도우기법(Scaling window scheme)이 필요하다[11].

3.2.3 최적 PID 계수 집합

그림 3.2는 무차원 제어시스템으로부터 PID 제어기를 최적으로 동조하여 계수 집합(Parameter set)을 얻기 위한 블록선도를 보여주고 있다.

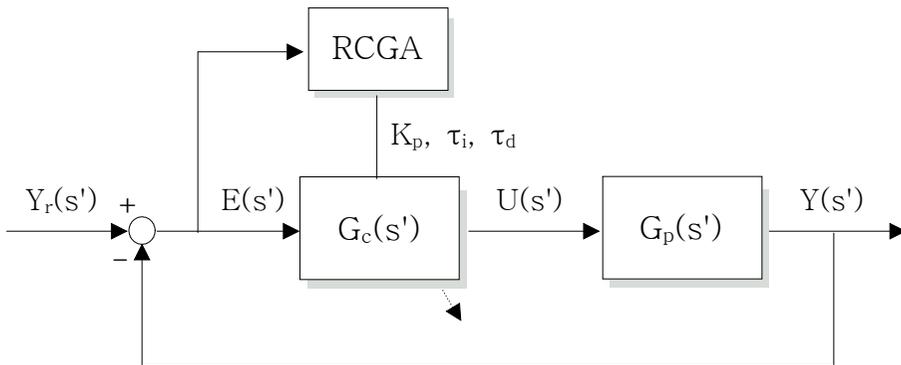


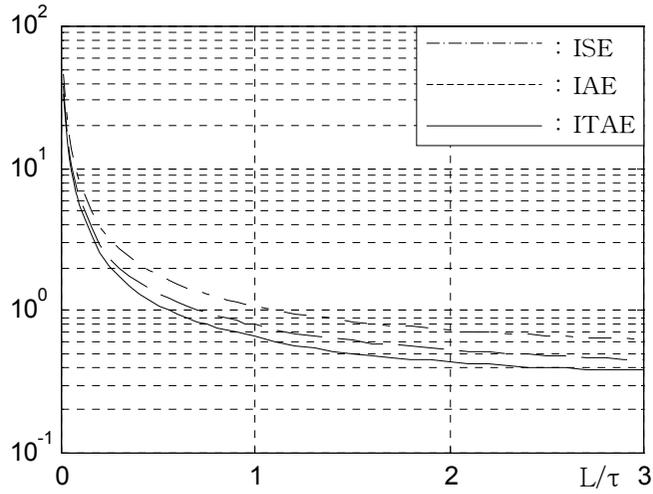
그림 3.2 RCGA를 이용한 PID 제어기의 최적동조

Fig. 3.2 Optimal tuning of the PID controller using a RCGA

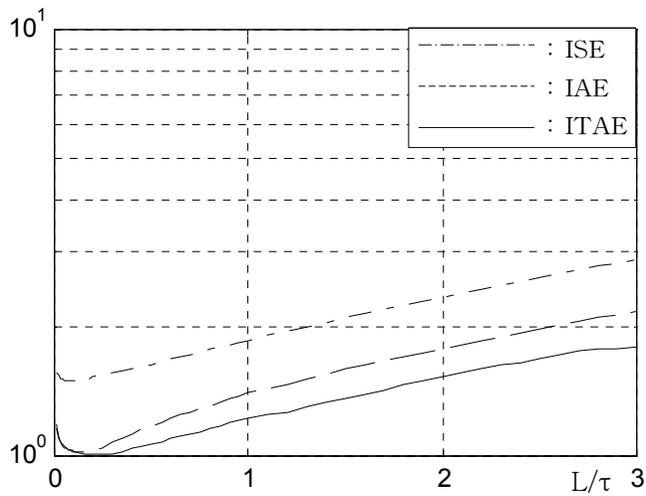
각각의 성능지수에 대해 최적의 계수 집합을 얻기 위해 RCGA의 제어 변수(Control parameter)로는 집단의 크기 $N=20$, 재생산 계수 $\eta_i=1.7(0 \leq i \leq N)$, 교배확률 $P_c=0.9$, 돌연변이 확률 $P_m=0.1$ 을 사용하였고, PID 계수들은 각각 구간 $0 \leq K_p \leq K_{pm}$, $0 \leq \tau_i \leq \tau_{im}$, $0 \leq \tau_d \leq \tau_{dm}$ 에서 탐색되었다. 여기서 K_{pm} , τ_{im} , τ_{dm} 은 탐색되어야 할 계수들의 경계값을 의미한다.

그림 3.3은 세 성능지수에 대해 무차원 값 L/τ 을 0에서 3까지 변경하면서 RCGA로 PI 제어기의 $K\hat{K}_p$, $\hat{\tau}_i/\tau$ 를 구해 그린 것이고, 그림 3.4는 L/τ 에

대한 PID 제어기의 $K\hat{K}_p$, $\hat{\tau}_i/\tau$, $\hat{\tau}_d/\tau$ 를 그린 것이다. 계산된 모든 값들은 독립된 씨드(Seed)로 프로그램을 5번 실행하고 평균한 결과이다.



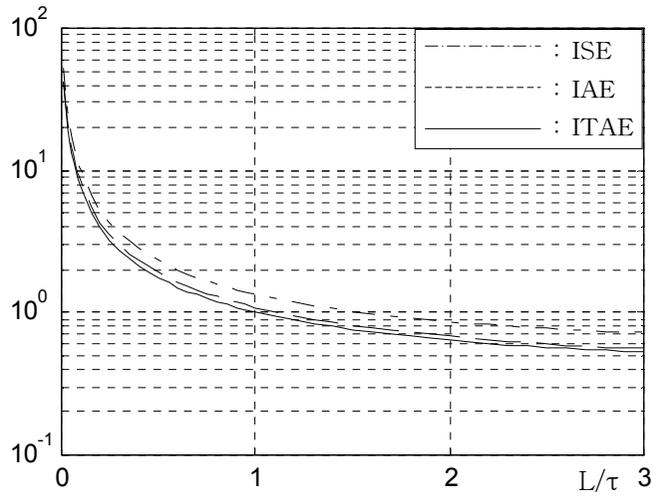
(a) $K\hat{K}_p$



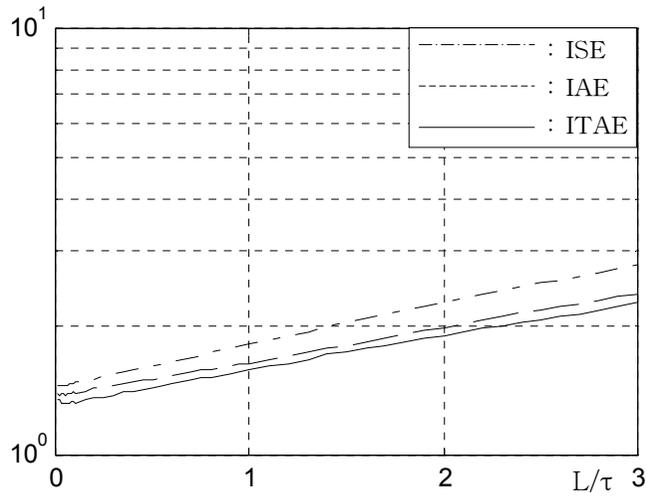
(b) $\hat{\tau}_i/\tau$

그림 3.3 계단상의 설정치 추종에 대한 최적 PI 계수

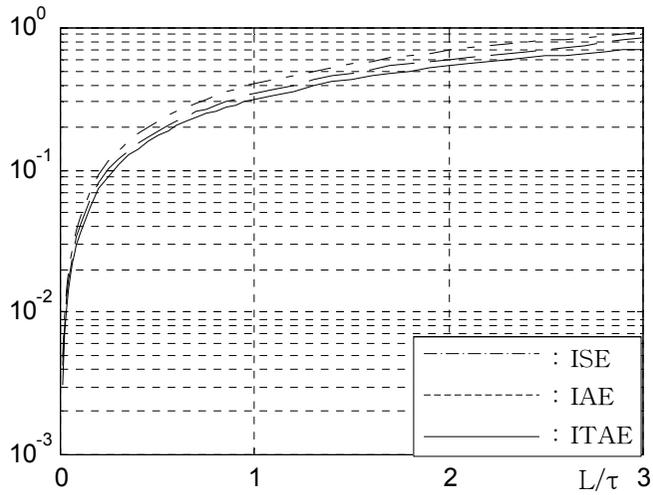
Fig. 3.3 Optimal PI parameter sets for step set-point tracking



(a) \hat{K}_p



(b) $\hat{\tau}_i/\tau$



(c) $\hat{\tau}_d/\tau$

그림 3.4 계단상의 설정치 추종에 대한 최적 PID 계수

Fig. 3.4 Optimal PID parameter sets for step set-point tracking

3.3 제안한 동조규칙

앞 절에서는 L/τ 에 대하여 세 가지 성능지수 값을 최소화 하는 최적의 계수 집합을 구하였다. 계산된 데이터를 이용하여 새로운 규칙을 얻기 위하여 표 3.1과 같이 KK_p , τ_i/τ , τ_d/τ 에 대해 각각 2, 3, 2개의 동조규칙 모델을 고려하였다. 이들은 앞 장에서 다룬 기존의 동조규칙들을 일반화한 것으로 생각할 수 있다.

표 3.1 동조규칙 모델

Table 3.1 Tuning rules models

Type	Tuning rule models		
	KK_p	τ_i/τ	τ_d/τ
PI PID	$a_0 \left(\frac{\tau}{L}\right)^{a_1}$	$a_0 + a_1 \frac{L}{\tau}$	$\frac{a_2}{a_0 + a_1 \left(\frac{L}{\tau}\right)^{-1}}$
	$a_0 + a_1 \frac{\tau}{L}$	$\frac{a_1 + a_2 \frac{L}{\tau}}{1 + a_0 \left(\frac{L}{\tau}\right)^{-1}}$	$a_0 \left(\frac{L}{\tau}\right)^{a_1}$
		$\frac{1}{a_0 - a_1 \frac{L}{\tau}}$	

여기서 발생하는 최적화 문제에도 RCGA를 적용하며 RCGA는 아래의 성능지수 값이 최소가 되도록 동조규칙 모델 파라미터를 조정하게 된다.

$$J = \sum_i |K_p - \hat{K}_p| \quad (3.12)$$

$$J = \sum_i |\tau_i - \hat{\tau}_i| \quad (3.13)$$

$$J = \sum_i |\tau_d - \hat{\tau}_d| \quad (3.14)$$

이들 또한 최소화 문제이므로 적합도 함수는 다음과 같이 정의된다.

$$f = -J + \gamma \quad (f > 0) \quad (3.15)$$

여기서 γ 도 선택압을 높이기 위해 매 세대 시 적절히 변경된다.

그림 3.5는 RCGA와 식 (3.12)–(3.14)의 평가함수를 이용하여 동조규칙 모델의 계수를 조정하는 과정을 보여준다.

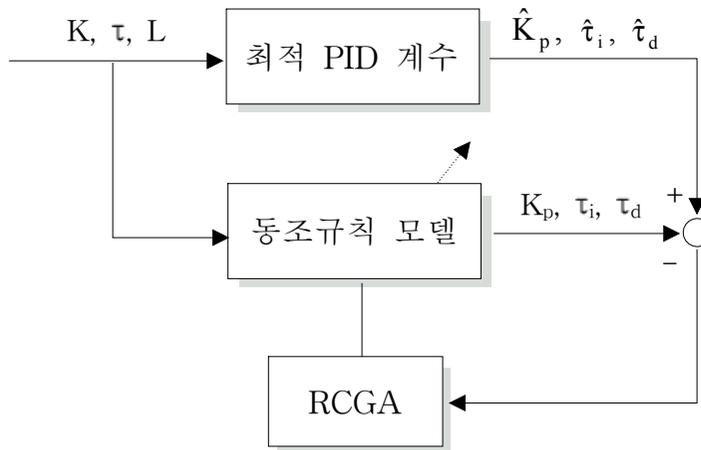


그림 3.5 RCGA를 이용한 동조규칙 모델의 계수 조정

Fig. 3.5 Parameter adjustment of the tuning rule models using a RCGA

각각의 PID 계수 집합과 동조규칙 모델에 대해 독립된 씨드로 프로그램을 5번 실행하고 평균한 결과 평가함수 값이 최소가 되는 규칙을 얻을 수 있었다. 표 3.2는 각 성능지수에 대한 최적화된 PI 동조규칙을 나타낸 것이고, 표 3.3은 최적화된 PID 동조규칙을 나타낸 것이다.

표 3.2 계단상의 설정치 추종에 대한 최적 PI 동조규칙

Table 3.2 Optimal PI tuning rules for step set-point tracking

Types	Tuning rules	
	$K\hat{K}_p$	$\hat{\tau}_i / \tau$
ISE	$0.4020 + 0.6688 \frac{\tau}{L}$	$1.3806 + 0.4938 \frac{L}{\tau}$
IAE	$0.2781 + 0.5140 \frac{\tau}{L}$	$0.9954 + 0.3968 \frac{L}{\tau}$
ITAE	$0.2132 + 0.4480 \frac{\tau}{L}$	$0.9154 + 0.3068 \frac{L}{\tau}$

표 3.3 계단상의 설정치 추종에 대한 최적 PID 동조규칙

Table 3.3 Optimal PID tuning rules for step set-point tracking

Types	Tuning rules		
	$K\hat{K}_p$	$\hat{\tau}_i / \tau$	$\hat{\tau}_d / \tau$
ISE	$1.4051 \left(\frac{\tau}{L}\right)^{0.8213}$	$1.3721 + 0.4595 \frac{L}{\tau}$	$\frac{5.8475}{2.3258 + 12.1578 \left(\frac{L}{\tau}\right)^{-1}}$
IAE	$1.1395 \left(\frac{\tau}{L}\right)^{0.8250}$	$1.3170 + 0.3463 \frac{L}{\tau}$	$\frac{4.0555}{1.6935 + 10.0121 \left(\frac{L}{\tau}\right)^{-1}}$
ITAE	$1.0433 \left(\frac{\tau}{L}\right)^{0.8379}$	$1.2744 + 0.3193 \frac{L}{\tau}$	$\frac{4.7078}{2.4788 + 12.5015 \left(\frac{L}{\tau}\right)^{-1}}$

제 4 장 시뮬레이션 및 결과 검토

앞 장에서는 세 가지 성능지수를 고려하고 각각에 대해 최적의 동조규칙을 얻었다. 제안한 동조규칙의 유효성을 검토하기 위해 시뮬레이션을 실시한다. 제어대상으로는 문헌에 자주 인용되는 시간지연을 갖는 2, 3차 과감쇠 시스템을 선정하였다[15,16]. 제안한 동조규칙을 적용하고 Z-N 개루프법, C-C법, IMC법, L-ITAE법의 동조결과를 비교검토하기 위하여 제어대상의 근사화 작업에는 참고문헌의 기법[12]이 사용되었고, 여기에는 IAE형의 평가함수와 RCGA가 사용된다. IMC 동조규칙에서 PI 제어기의 경우에는 $\lambda/L = 1.7$ 을, PID 제어기의 경우에는 $\lambda/L = 0.25$ 를 사용하였다 [9,10].

4.1 예제 1

첫 번째 예제로 시간지연을 가지는 2차 과감쇠 시스템이 고려되었다.

$$G_p(s) = \frac{\exp(-2s)}{(1+10s)(1+s)} \quad (4.1)$$

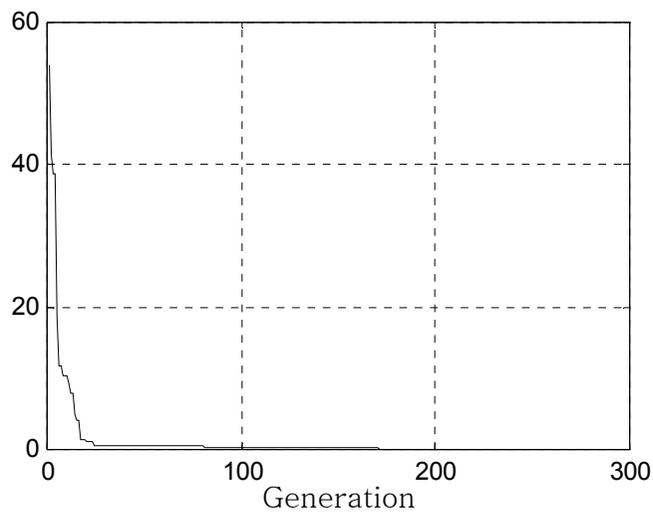
4.1.1 모델의 근사화

1차 시간지연 모델로의 근사화 작업에는 RCGA가 사용되었고, 파라미터들은 각각 $0 \leq K \leq 20$, $0 \leq \tau \leq 20$, $0 \leq L \leq 10$ 의 구간에서 탐색되었다. 이때 샘플링 시간은 $h = 0.05$ 초 이었다. 시뮬레이션 결과 다음 근사모델을 얻을 수 있었고, 이는 $L/\tau = 0.31 < 1$ 이어서 시정수에 비해 시간지연이 짧은 시

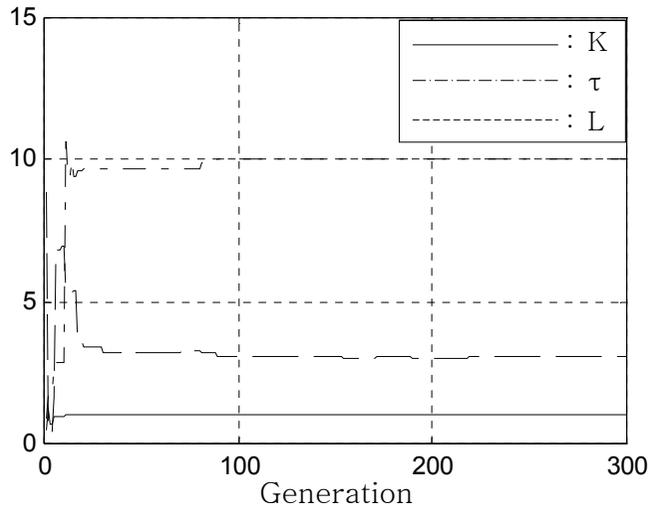
스텝임을 알 수 있었다.

$$G_m(s) = \frac{1.00 \exp(-3.06s)}{1 + 10.002} \quad (4.2)$$

그림 4.1은 RCGA가 모델의 파라미터를 탐색해 가는 과정을 보여주고 있다. 그림에서 보면 200세대 이전에 해를 찾고 있다.



(a) Objective function



(b) Parameters

그림 4.1 모델 파라미터의 진화적 탐색

Fig. 4.1 Evolutionary search of the model parameters

그림 4.2는 시스템과 추정된 모델에 계단응답을 인가하여 모델을 검증한 것이다. 그림으로부터 모델은 시스템과 잘 일치함을 확인할 수 있다.

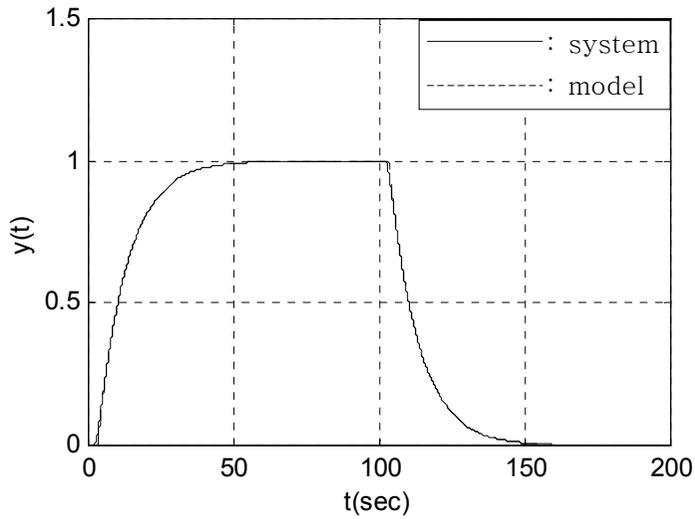


그림 4.2 추정된 모델의 검증

Fig. 4.2 Verification of the estimated model

4.1.2 PI 제어기의 응답비교

근사 모델로부터 구한 세 파라미터를 기반으로 제안한 방법과 Z-N 개루프법, C-C법, IMC법, L-ITAE법의 동조결과를 비교하도록 응답실험을 실시하고 최대 오버슈트(M_p), 도달시간(t_r), 5% 정정시간(t_s), 최대입력(u_{max})을 구해 표 4.1에 나타내었다.

표 4.1 PI 동조규칙의 성능비교

Table 4.1 Performance comparisons of the PI tuning methods

Tuning methods	Parameters		Performance			
	\hat{k}_p	\hat{t}_i	M_p	t_r	$t_s(5\%)$	u_{max}
Z-N	2.9374	10.1128	31.40	3.22	20.59	3.58
C-C	3.0207	6.2634	55.75	2.86	29.61	4.14
IMC	2.2140	11.5340	10.47	4.54	14.34	2.64
L-ITAE	1.7317	10.2117	4.71	6.03	10.08	2.13
GA-ISE	2.5848	15.3217	10.98	4.01	22.39	2.95
GA-IAE	1.9557	11.1717	5.99	5.29	14.07	2.35
GA-ITAE	1.6754	10.0958	4.13	6.28	10.43	2.07

GA-ISE, GA-IAE, GA-ITAE는 본 연구에서 다룬 세 가지 동조규칙의 결과이다. Z-N법과 C-C법은 M_p 와 t_s 가 둘 다 큰 경향을 보이며, GA-ISE는 IMC의 결과와 비슷하나 기대했듯이 GA-IAE, GA-ITAE보다 M_p 와 t_s 가 크고 GA-IAE는 두 ITAE 규칙보다는 t_r 이 앞서지만은 M_p 와 t_s 가 크고, 두 ITAE는 오차에 시간 가중치를 두었기 때문에 가장 만족스러운 성능을 확인할 수 있었다.

그림 4.3은 비교 목적으로 40초간 단위계단응답을 그린 것이다.

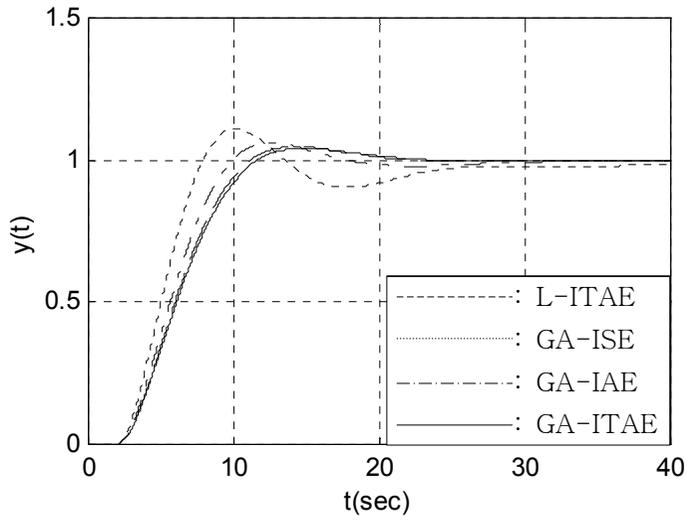
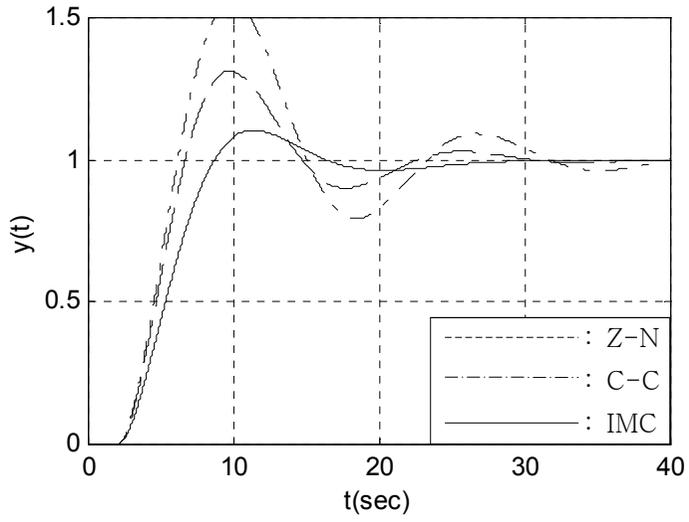


그림 4.3 PI 제어기의 응답비교

Fig. 4.3 Response comparison of the PI controllers

4.1.3 PID 제어기의 응답비교

PID의 경우도 동일한 방법으로 응답실험을 실시하고 PID 계수, M_p , t_r , t_s , u_{max} 을 구해 표 4.2에 나타내었다.

표 4.2 PID 동조규칙의 성능비교

Table 4.2 Performance comparisons of the PID tuning methods

Tuning methods	Parameters			Performance			
	\hat{K}_p	$\hat{\tau}_i$	$\hat{\tau}_d$	M_p	t_r	$t_s(5\%)$	u_{max}
Z-N	3.9165	6.1290	1.5322	32.29	2.40	18.33	5.20
C-C	4.6016	6.7113	1.0556	50.79	2.10	12.05	5.98
IMC	3.0110	11.5340	1.3287	5.02	3.72	14.67	3.54
L-ITAE	2.6375	13.3186	1.0266	1.32	4.48	8.19	3.04
GA-ISE	3.7121	15.1316	1.3923	4.71	3.00	6.15	4.21
GA-IAE	3.0236	14.2336	1.1801	1.52	3.83	7.31	3.45
GA-ITAE	2.8109	13.7247	1.0879	1.52	4.16	7.74	3.22

PID 제어의 경우에도 Z-N법과 C-C법은 M_p 와 t_s 가 둘 다 큰 경향을 보이며, IMC 또한 L-ITAE, GA-ISE, GA-IAE, GA-ITAE 보다 M_p 가 크고 t_s 가 길었다. 한편 L-ITAE, GA-ISE, GA-IAE, GA-ITAE 모두 만족스러운 성능을 확인할 수 있었다. 이 중에서 GA-ISE는 나머지보다 M_p 가 약간 크지만 대신 t_r 과 t_s 가 짧아지는 결과를 보여주었다.

그림 4.4는 40초간의 단위계단 응답을 그린 것이다.

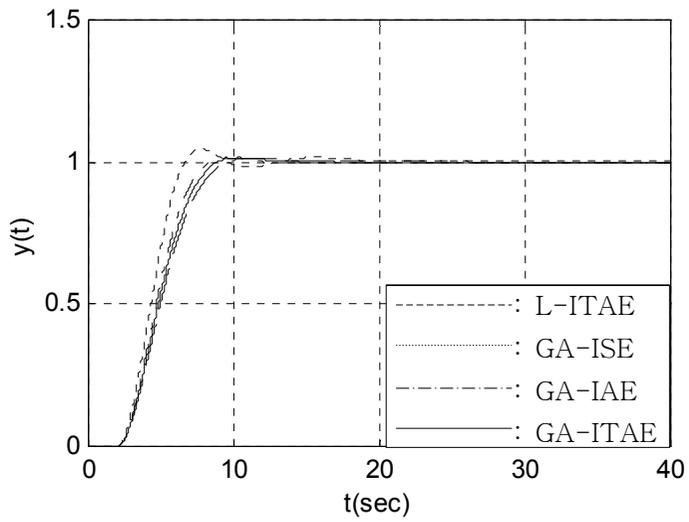
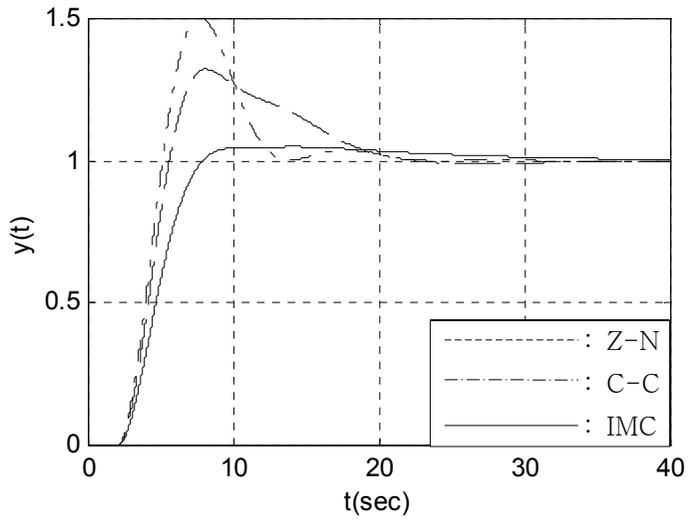


그림 4.4 PID 제어기의 응답비교

Fig. 4.4 Response comparison of the PID controllers

4.2 예제 2

다음은 시간지연을 갖는 3차 시스템이 고려되었다.

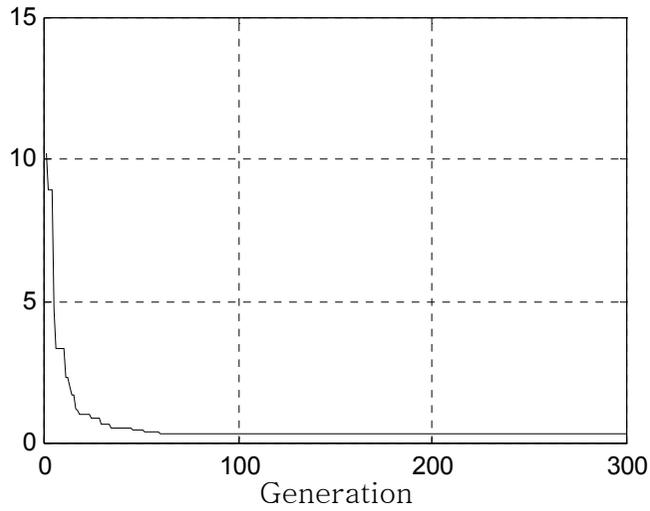
$$G_p(s) = \frac{\exp(-s)}{(s+1)(2s+1)(0.5s+1)} \quad (4.3)$$

4.2.1 모델의 근사화

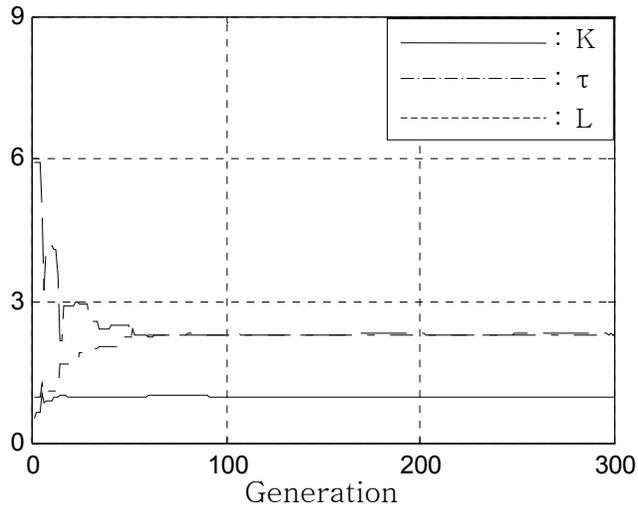
예제 1과 같이 모델의 근사화에는 RCGA가 사용되었으며, 파라미터들은 각각 $0 \leq K \leq 20$, $0 \leq \tau \leq 20$, $0 \leq L \leq 10$ 의 구간에서 탐색되었다. 시뮬레이션 결과 다음 근사모델을 얻을 수 있었고, $L/\tau \approx 1$ 인 시스템임을 알 수 있었다.

$$G_m(s) = \frac{1.001 \exp(-2.32s)}{1 + 2.306s} \quad (4.4)$$

그림 4.5는 RCGA가 모델의 파라미터를 탐색해 가는 과정을 나타낸 것이다.



(a) Objective function



(b) Parameters

그림 4.5 모델 파라미터의 진화적 탐색

Fig. 4.5 Evolutionary search of the model parameters

그림 4.6은 시스템과 추정된 모델을 검증한 것이다.

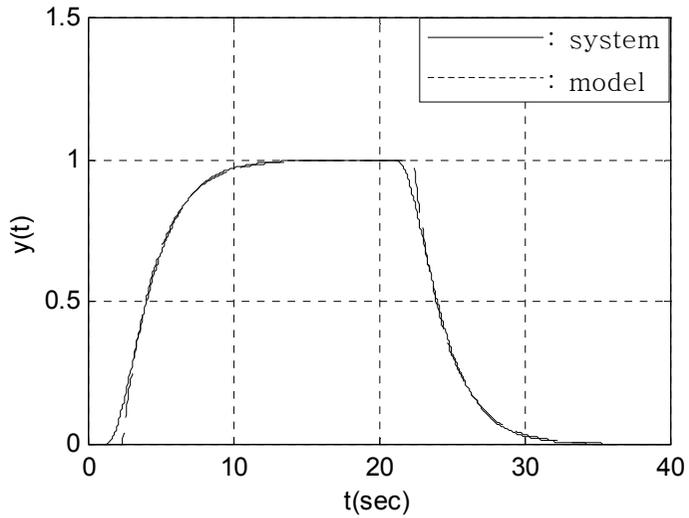


그림 4.6 추정된 모델의 검증

Fig. 4.6 Verification of the estimated model

4.2.2 PI 제어기의 응답비교

예제 1과 동일한 방법으로 응답실험을 실시하고 제어성능을 구해 표 4.3에 나타내었다. 그림 4.7은 30초간의 단위계단 응답을 그린 것이다.

표 4.3 PI 동조규칙의 성능비교

Table 4.3 Performance comparisons of the PI tuning methods

Tuning methods	Parameters		Performance			
	\hat{K}_p	\hat{t}_i	M_p	t_r	$t_s(5\%)$	u_{max}
Z-N	0.8948	7.6437	-	20.66	32.23	1.07
C-C	0.9780	2.6286	29.55	2.52	15.09	1.69
IMC	0.8786	3.4640	6.91	3.22	14.25	1.35
L-ITAE	0.5828	2.6680	1.96	4.59	7.60	1.12
GA-ISE	1.0664	4.3272	7.92	2.83	14.23	1.47
GA-IAE	0.7888	3.2143	5.07	3.53	8.28	1.27
GA-ITAE	0.6583	2.8214	3.68	4.06	6.87	1.18

Z-N법은 언더슈트가 발생하고 t_r 과 t_s 가 길고, C-C법은 M_p 가 크고 t_r 과 t_s 가 길었다. 한편 GA-ISE는 IMC와 비슷한 응답을 보이나 t_r 이 짧아지는 결과를 확인할 수 있었고, L-ITAE, GA-IAE, GA-ITAE는 모두 만족스런 성능을 확인할 수 있었다. 이 중에서 GA-ITAE는 L-ITAE보다 M_p 가 약간 크지만 대신 t_r 과 t_s 가 짧아지는 결과를 보여주었다.

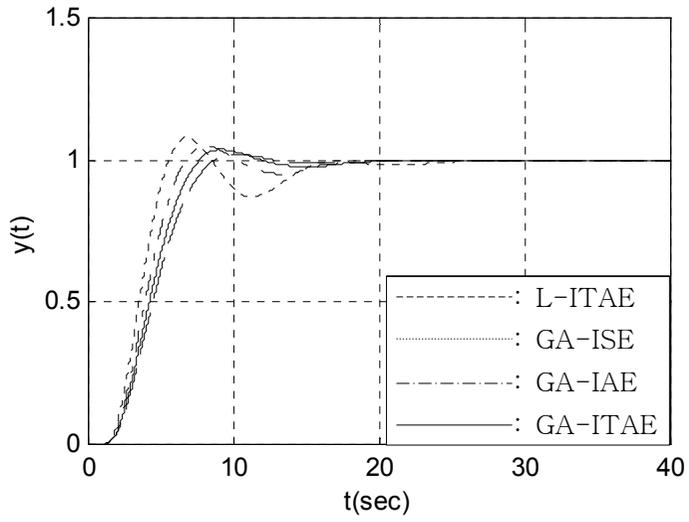
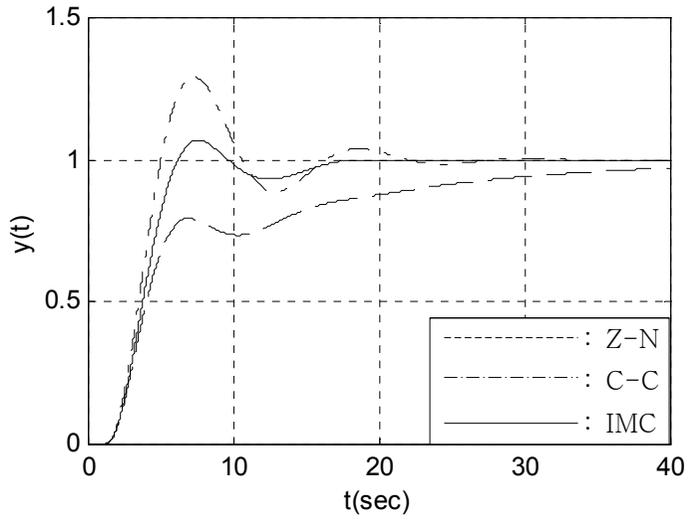


그림 4.7 PI 제어기의 응답비교

Fig. 4.7 Response comparison of the PI controllers

4.2.3 PID 제어기의 응답비교

예제 1과 동일한 방법으로 응답실험을 실시하고 PID 계수와 성능을 구해 표 4.4에 나타내었다. 그림 4.8은 30초간의 단위계단 응답을 그린 것이다.

표 4.4 PID 동조규칙의 성능비교

Table 4.4 Performance comparisons of the PID tuning methods

Tuning methods	Parameters			Performance			
	\hat{K}_p	\hat{t}_i	\hat{t}_d	M_p	t_r	$t_s(5\%)$	u_{max}
Z-N	1.1931	4.6326	1.1581	-	3.69	8.74	1.48
C-C	1.5753	4.1871	0.7122	17.53	2.02	7.28	2.00
IMC	1.1949	3.4640	0.7709	10.72	2.54	8.75	1.61
L-ITAE	0.9601	3.5565	0.7132	1.72	3.37	5.97	1.31
GA-ISE	1.3209	4.1810	0.9370	3.25	2.54	4.81	1.68
GA-IAE	1.0739	3.7943	0.7971	1.69	3.08	5.56	1.42
GA-ITAE	0.9801	3.6544	0.7260	1.02	3.35	5.96	1.32

Z-N법은 언더슈트가 발생하고 t_s 가 길었고, C-C법과 IMC는 기대했듯이 L-ITAE, GA-ISE, GA-IAE, GA-ITAE 보다 M_p 가 크고 t_s 가 길었다. 한편 L-ITAE, GA-ISE, GA-IAE, GA-ITAE 모두 만족스러운 성능을 확인할 수 있었다. 이중에서 GA-ISE는 나머지보다 M_p 가 약간 크고 대신 t_r 과 t_s 가 짧아지는 결과를 보여주었다.

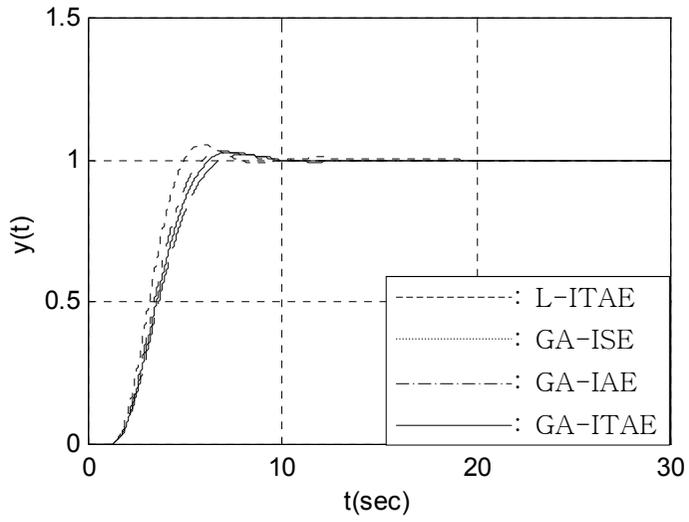
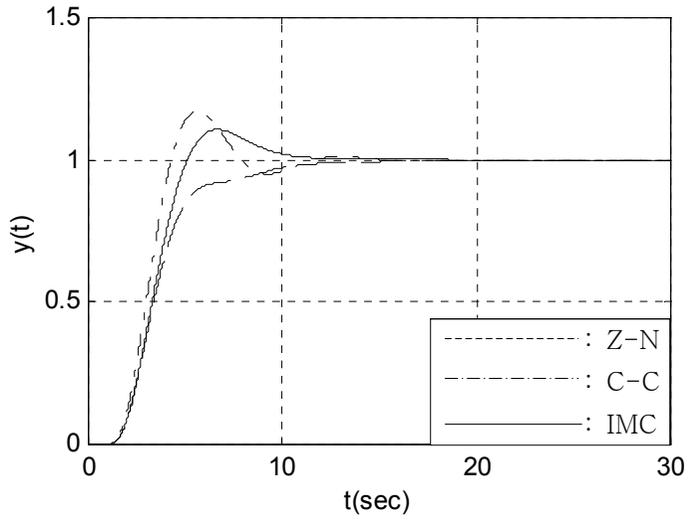


그림 4.8 PID 제어기의 응답비교

Fig. 4.8 Response comparison of the PID controllers

4.3 예제 3

마지막으로 시간지연이 다소 큰 다음의 3차 시스템이 고려되었다.

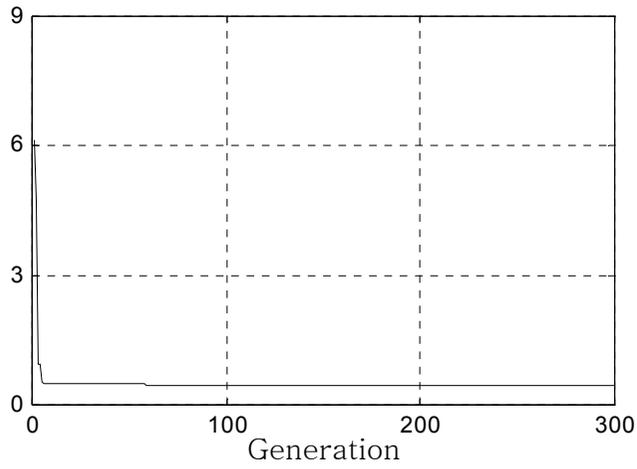
$$G_p(s) = \frac{\exp(-5s)}{(s+1)^2(2s+1)} \quad (4.5)$$

4.3.1 모델의 근사화

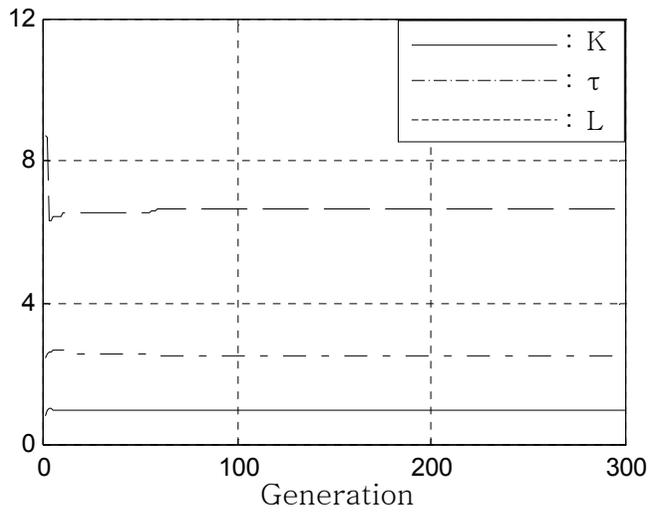
앞의 예제들과 마찬가지로 모델의 근사화에는 RCGA가 사용되었고, 파라미터들은 각각 $0 \leq K \leq 20$, $0 \leq \tau \leq 20$, $0 \leq L \leq 10$ 의 구간에서 탐색되었다. 다음 근사모델을 얻을 수 있었고, $L/\tau \approx 2.7 > 1$ 인 시스템임을 알 수 있었다.

$$G_m(s) = \frac{1.002\exp(-6.64s)}{1 + 2.497s} \quad (4.6)$$

그림 4.9는 RCGA가 모델의 파라미터를 탐색해 가는 과정을 나타낸 것이다.



(a) Objective function



(b) Parameters

그림 4.9 모델 파라미터의 진화적 탐색

Fig. 4.9 Evolutionary search of the model parameters

그림 4.10은 시스템과 모델에 계단응답을 인가하여 추정된 모델을 검증한

것이다.

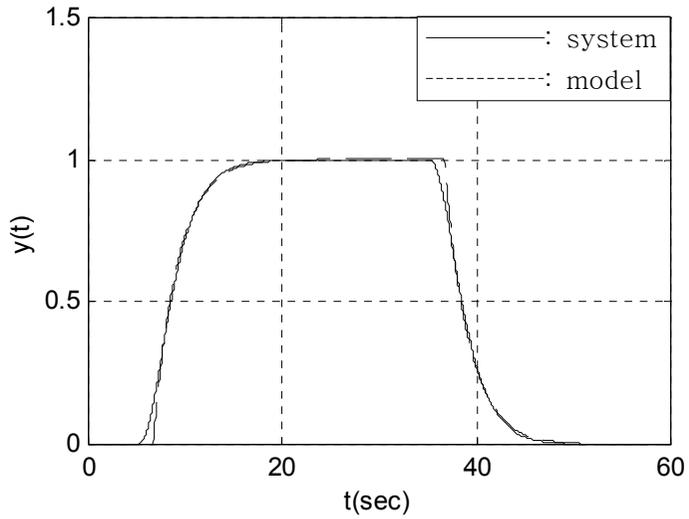


그림 4.10 추정된 모델의 검증

Fig. 4.10 Verification of the estimated model

4.3.2 PID 제어기의 응답비교

앞의 예제들과 동일한 방법으로 응답실험을 실시하고 그 결과를 표 4.5에 나타내었다. 그림 4.11은 80초간의 단위계단 응답을 그린 것이다.

표 4.5 PI 동조규칙의 성능비교

Table 4.5 Performance comparisons of the PI tuning methods

Tuning methods	Parameters		Performance			
	\hat{K}_p	$\hat{\tau}_i$	M_p	t_r	$t_s(5\%)$	u_{max}
Z-N	0.3376	21.9134	-	157.73	220.46	0.98
C-C	0.4208	4.0552	12.98	6.92	25.11	1.17
IMC	0.5141	5.8171	1.95	7.00	33.22	1.07
L-ITAE	0.2387	4.2235	-	25.56	42.14	1.0
GA-ISE	0.6520	6.7263	12.65	5.42	32.24	1.23
GA-IAE	0.4703	5.1203	3.85	7.23	32.46	1.08
GA-ITAE	0.3808	4.3229	1.85	8.61	16.88	1.04

C-C법은 M_p 가 크고 t_s 가 길고, IMC는 M_p 는 작지만 t_s 가 긴 경향을 보이며, Z-N법은 시간지연이 큰 시스템에 적용하기가 곤란함을 알 수 있다. 한편 L-ITAE법은 시간지연이 큰 시스템에서는 제안한 세 가지 동조법보다 성능이 뒤지며 특히 GA-ITAE는 GA-ISE, GA-IAE보다 성능이 두드러짐을 확인할 수 있었다.

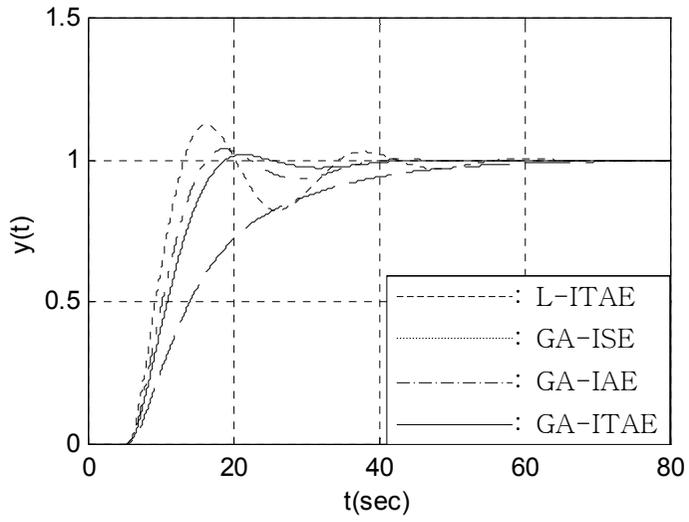
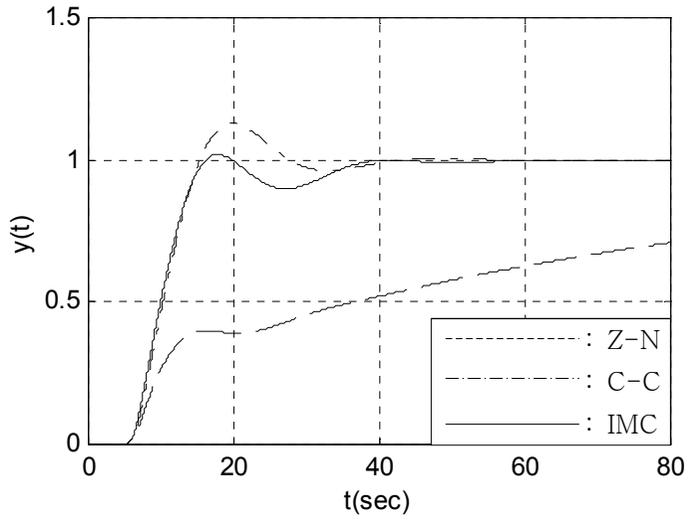


그림 4.11 PI 제어기의 응답비교

Fig. 4.11 Response comparison of the PI controllers

4.3.3 PID 제어기의 응답비교

앞의 예제들과 동일한 방법으로 응답실험을 실시하고 표 4.6에 나타내었다. 그림 4.12는 80초간의 단위계단 응답을 그린 것이다

표 4.6 PID 동조규칙의 성능비교

Table 4.6 Performance comparisons of the PID tuning methods

Tuning methods	Parameters			Performance			
	\hat{K}_p	$\hat{\tau}_i$	$\hat{\tau}_d$	M_p	t_r	$t_s(5\%)$	u_{max}
Z-N	0.4502	13.2809	3.3202	-	64.34	95.40	0.97
C-C	0.7497	9.2909	1.6277	-	5.29	39.91	1.16
IMC	0.6992	5.8171	1.4251	17.55	4.66	26.31	1.33
L-ITAE	0.4192	6.1643	1.9080	-	20.90	36.31	1.00
GA-ISE	0.5832	6.0993	2.0931	-	6.40	23.72	1.08
GA-IAE	0.4721	5.2211	1.7362	-	8.51	19.62	1.00
GA-ITAE	0.4248	5.1192	1.5709	-	11.29	24.44	1.00

Z-N법은 t_r 과 t_s 가 길고, C-C법은 t_s 가 길며, IMC의 경우에는 M_p 와 t_s 둘 다 큰 경향을 보임을 알 수 있었다. 한편 L-ITAE는 시간지연이 큰 시스템에서는 제안한 세 가지 동조법보다 성능이 뒤지며, GA-ISE, GA-IAE, GA-ITAE는 다소 t_s 가 길지만 이와 같은 시스템에 잘 적용될 수 있었다. 특히 GA-ISE는 GA-IAE와 GA-ITAE보다 t_r 면에서는 나은 결과를 보여주었다.

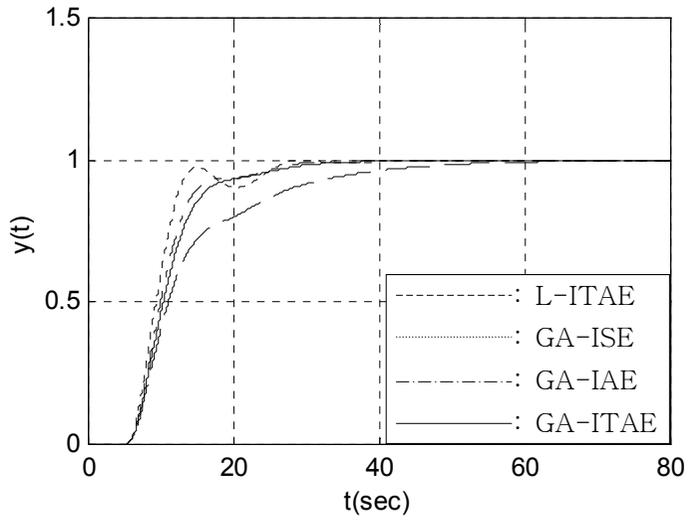
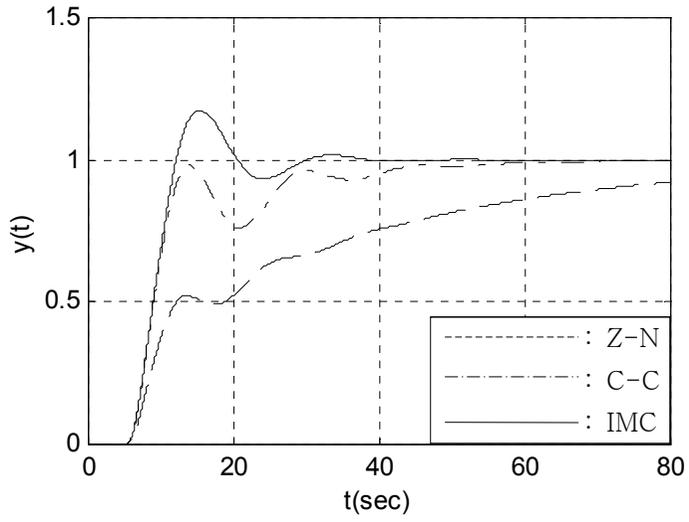


그림 4.12 PID 제어기의 응답비교

Fig. 4.12 Response comparison of the PID controllers

제 5 장 결론

본 논문에서는 세 가지 성능지수 ISE IAE, ITAE를 사용하여 계단상의 설정치 변화에 추종성능이 개선되도록 모델과 RCGA를 이용하여 PI 및 PID 제어기의 최적 동조규칙을 얻었다. 먼저 1차 시간지연 모델에 대해서 RCGA는 각 성능지수를 최소화하도록 PID 계수 집합을 결정하고, 다음 계산된 계수 집합과 동조규칙 모델, RCGA를 이용하여 PI 및 PID 동조규칙을 유도하였다. 주어진 고차 시스템을 온라인 파라미터 추정기법을 사용하여 1차 시간지연 모델로 근사화 하여 제안한 동조규칙을 적용하고 계산상의 설정치 변경에 대한 추종성능을 비교하였다. 성능비교를 통하여 제안한 동조규칙들이 만족스러운 제어성능을 제공함을 알 수 있다.

차후 연구로는 외란제거 목적의 최적 동조규칙과 2차 시간지연 모델을 이용하는 연구가 필요하다고 본다.

참고문헌

- [1] Y. Nozaka, "Trend of new control theory application in industrial process control (survey)," *Proc. IFAC 12th Triennial World Cong.*, Vol. 4, pp. 215-218, 1993.
- [2] J. G. Ziegler and N. B. Nichols, "Optimum setting for PID controllers," *Trans. ASME*, Vol. 64, pp. 759-768, 1942.
- [3] G. H. Cohen and G. A. Coon, "Theoretical considerations of retarded control," *Trans. ASME*, Vol. 75, pp. 827-834, 1953.
- [4] K. J. Åström and T. Hägglund, "Automatic tuning of simple regulators with specifications on phase and amplitude margins," *Automatica*, Vol. 20, pp. 645-651, 1984.
- [5] T. Yamamoto et al., "Intelligent tuning PID controllers," *Proc. IEEE Int. Conf. on SMC*, Vol. 5, pp. 2610-2615, 1995.
- [6] E. H. Bristol, "Pattern recognition: an alternative to parameter identification in adaptive control," *Automatica*, Vol. 13, pp. 197-202, 1977.
- [7] P. Wang and D. P. Kwok, "Optimal design of PID process controllers based on genetic algorithms," *Proc. 12th Triennial World Congress of IFAC, Sydney, Australia*, Vol. 4, pp. 193-197, 1993.
- [8] A. M. Lopez, C. L. Miller and C. L. Murill, "Tuning controller with error-integral criteria," *Instrumentation Technology*, Vol. 14(2), 57-62, 1967.
- [9] M. Morari, E. Zafiriou, *Robust Process Control*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1989.

- [10] S. W. Sung and I. B. Lee, *PID Controllers and Automatic Tuning*, A-Jin Publishing co., Korea, 1999.
- [11] J. J. Grefenstette, "Optimization of control parameters for genetic algorithms," *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, Vol. SMC-16, pp. 122-128, 1986.
- [12] 이현식, 진강규, "유전알고리즘을 이용한 연속시스템의 온라인 퍼래미터 추정," 제어·자동화·시스템공학 논문지, 제4권, 제1호, pp. 76-81, 1998.
- [13] 진강규, 주상래, "실수코딩 유전알고리즘에 관한 연구," 제어·자동화·시스템공학 논문지, 제6권, 제4호, pp.268-275, 2000.
- [14] 진강규, 유전알고리즘과 그 응용, 교우사, 2000.
- [15] G. Jin and S. Joo, "A study on a real-coded genetic algorithm," *Journal of Control Automation and Systems Engineering*, Vol. 6, no. 4, pp. 268-275, 2000.
- [16] M. Yuwana and D. E. Seborg, "A new method for on-line controller tuning," *AIChE J.*, Vol. 28, No. 3, pp. 434-440, 1982.
- [17] 강원룡, "실수코딩 유전알고리즘과 단체법을 결합한 하이브리드 탐색법," 한국해양대학교 제어계측공학과 석사학위 논문, 2002.