

공학석사 학위논문

외란제거용 *PID* 제어기의 *RCGA* 기반  
동조

*RCGA-Based Tuning of the PID Controller for  
Disturbance Rejection*

지도교수   진   강   규

2007년 2월

한국해양대학교 대학원

제어계측공학과

김   민   정

본 논문을 김민정의 공학석사 학위논문으로 인준함

위원장 공학박사 김 종 화



위 원 공학박사 유 영 호



위 원 공학박사 진 강 규



2006年 12月 7日

한국해양대학교 대학원  
제어계측공학과

# 목차

제 1 장 서론 .....	1
제 2 장 제어대상과 기존의 동조규칙 .....	3
2.1 PID 제어시스템의 구성 .....	3
2.2 기존의 동조규칙 .....	5
2.2.1 Ziegler-Nichols 동조법 .....	5
2.2.2 Cohen-Coon 동조법 .....	9
2.2.3 IMC 동조법 .....	11
2.2.4 Lopez ITAE 동조법 .....	11
제 3 장 최적화 도구로서의 <i>RCGA</i> .....	13
3.1 유전알고리즘 .....	13
3.1.1 유전알고리즘의 원리 .....	13
3.1.2 탐색 절차 .....	14
3.1.3 유전알고리즘의 특징 .....	16
3.2 <i>RCGA</i> .....	17
3.2.1 기본 유전 연산자 .....	17
3.2.2 적합도 평가 .....	19
제 4 장 <i>RCGA</i> 를 이용한 동조규칙의 유도 .....	21
4.1 PID 제어시스템의 무차원화 .....	21
4.2 최적 PID 계수 집합 탐색 .....	22
4.3 동조규칙의 유도 .....	26

<b>제 5 장 시뮬레이션 및 결과검토</b> .....	<b>32</b>
5.1 예제 1 .....	32
5.1.1 시스템의 근사화 .....	33
5.1.2 PID 제어기의 응답비교 .....	34
5.2 예제 2 .....	36
5.2.1 시스템의 근사화 .....	36
5.2.2 PID 제어기의 응답비교 .....	38
5.3 예제 3 .....	40
5.3.1 시스템의 근사화 .....	41
5.3.2 PID 제어기의 응답비교 .....	43
<b>제 6 장 결론</b> .....	<b>46</b>
<b>참고문헌</b> .....	<b>47</b>

# *RCGA-Based Tuning of the PID Controller for Disturbance Rejection*

*Min-Jung Kim*

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

## *Abstract*

In industrial processes and many other control problems, even now more than 95% of the controllers are of the PID controller type. The PID controller has several important functions. It has ability to eliminate steady-state error through integral action and anticipate the future through derivative action. The PID controller, therefore, can not only track the given set-point but reject the disturbance that enters the control loop. This is the most basic reason that there exist many different methods for tuning the PID controller.

In this thesis, tuning rules of the PID controller for load disturbance rejection are proposed incorporating with real-coded genetic algorithms(RCGAs). The optimal parameters sets of the PID controller are obtained based on a first-order plus time delay model and a RCGA. As for assessing the performance of the controller,

three performance criteria (ISE, IAE and ITAE) are adopted. Then tuning formulae are derived using the tuned parameters sets, potential tuning rule models and another RCGA.

A set of simulation works are carried out on three high order processes with time delay to verify the effectiveness of the proposed rules.

# 제 1 장 서론

오늘날 현대적 제어이론의 급속한 발전에도 불구하고 아직도 산업공정을 비롯한 석유, 화학, 발전 분야 등 대부분의 산업현장에서는 고전적인 PID 제어가 사용되고 있다[1]. 이는 PID 제어가 현장에서 요구되는 제어목적을 충분히 만족시키면서 구조가 간단하고, 조정해야 할 계수의 수가 적어 현장 기술자에게 친숙하기 때문이다. PID제어기는 간단한 구조를 갖고 있어서 DDC(Direct-Digital-Control) 패키지와 같은 형태로 저렴한 비용으로 구현하기에 알맞다. 그리고 적분동작을 갖고 있기 때문에 계단상의 입력을 정상상태 오차 없이 추종할 수 있고, 일정한 부하외란(Load disturbance)을 제거할 수 있다는 것이 PID제어기가 선호되는 무엇보다도 큰 이유이다.

고전적인 제어기의 파라미터 설정방법은 제어기에 대한 충분한 지식과 시스템의 수학적 해석 및 계산에 의해서 이루어진다. 그러나 이렇게 설계된 제어기도 주어진 환경에서 지역적일 수 있고, 성능이 안 좋은 제어기로 존재할 수 있다. 이런 이유 때문에 다양한 파라미터의 적용이 시도 되어야 하고, 수동적으로 동조되어야 하기도 하였다. 이러한 수동적인 동조 방법은 적절한 제어기 파라미터를 얻기 위해 시행착오로 인한 시간 소요가 많으므로 효과적이지 못하였다. 이에 스스로 그 시스템에 맞는 파라미터를 찾아내는 자동 동조 제어방법이 나타나기 시작했다. 자동 동조 제어기의 큰 장점으로서는 시스템을 효율적으로 제어하기 위한 적절한 제어기 파라미터를 자동적으로 추정할 수 있다는 것이다.

PID 제어기는 사용 환경에 따라 설정치 추종(Set-point tracking)성능 또는 외란억제(Disturbance rejection) 성능을 개선하도록 구분되어 동조된다. 지금까지 많은 동조규칙들이 제안되어 왔으나[2]-[5] 대부분의 경우 경험과 실험을 바탕으로 하고 있다. 이와 같은 경험적인 동규방법들은 여타의 방법에 비해 동조하기가 쉬운 장점을 가지지만, 수동으로 실험을 행하여 동조하는 과정으로 인해 운영자의 시간과 노력이 요구된다. 그러므로 보다 이론에 바탕을 둔 체계적

인 동조방법이 요구되고 있다[6].

최근 퍼지 및 지능 제어의 발달로 제어기의 설계에 여러 가지 이론들이 많이 접목되고 있다. 그 중 유전알고리즘(Genetic Algorithm)은 강력한 최적화 특성 때문에 퍼지 이론과 적응제어 시스템의 개발에 있어서 활발히 연구되는 분야다. 따라서 김[7] 등은 RCGA를 이용하여 설정치 추종용 PID 제어기의 동조규칙을 제안한 바 있다.

본 연구에서는 설정치는 고정되고 부하외란만 변동되는 환경에서 운전되는 PID 제어기의 외란제거 성능을 개선해주는 동조규칙을 얻는다. 이를 위해 먼저 RCGA를 이용하여 주어진 세 가지 성능지수(ISE, IAE, ITAE)를 최소로 하는 관점에서 최적계수를 구하고, 최적계수 집합과 동조규칙 모델과 또 다른 RCGA를 이용하여 일반화된 동조규칙을 얻는다. 제안하는 방법은 시뮬레이션을 통해 기존의 방법과 비교하여 그 유효성을 검토한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 제 2장에서는 PID 제어시스템의 구성을 개괄적으로 소개하고, 제 3장에서는 RCGA를 이용한 동조규칙을 유도하며, 제 4장에서는 논의된 방법을 시뮬레이션을 통하여 기존의 동조규칙과 제안한 동조규칙의 응답을 비교하여 제안한 동조규칙의 유효성을 밝히며, 마지막으로 제 5장에서는 결론을 제시한다.



## 제 2 장 제어대상과 기존의 동조규칙

외란 제거용 PID 제어기의 최적 동조규칙을 제안하기에 앞서 이 장에서는 PID 제어시스템의 구조와 기존의 몇 가지 동조법에 대해 살펴본다.

### 2.1 PID 제어시스템의 구성

제어대상으로부터 정확한 수학적 모델을 얻을 수 있는 경우에는, 페루프 시스템의 과도 및 정상 상태의 조건을 만족하는 PID 제어기의 파라미터를 결정하는데 여러 가지 설계방식의 적용이 가능하지만, 일반적으로 모델이 고차일수록 PID제어기 설계의 해석적 접근이 어렵게 된다. 다행히도 현장의 많은 복잡한 공정제어 시스템들은 고차이면서 비선형적인 동특성을 갖지만 동작점 부근에서 시간지연을 갖는 1차 시스템으로 근사화할 수 있어, 이를 대상으로 PID 제어기를 동조하는 많은 연구가 수행되어 왔다. 제어대상의 전달함수를  $G_p(s)$ , PID 제어기의 전달함수를  $G_c(s)$ 로 하여 페루프를 구성한 PID 제어시스템은 그림 2.1과 같다.

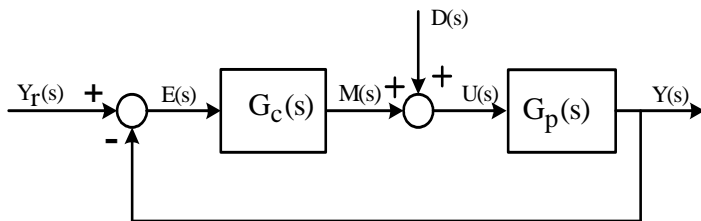


그림 2.1 PID 제어시스템의 블록선도

Fig. 2.1 Block diagram of a PID control system

따라서 본 논문에서는 제어대상으로는 (2.1)의 시간지연을 갖는 1차 시스템이, PID 제어기로는 (2.2)의 표준형이 채택된다.

$$G_p(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K e^{-Ls}}{1 + \tau s} \quad (2.1)$$

$$G_c(s) = \frac{M(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right) \quad (2.2)$$

여기서  $Y_r(s)$ ,  $Y(s)$ ,  $D(s)$ 는 각각 시스템의 설정치, 출력, 외란을 나타내고  $E(s)$ ,  $M(s)$ ,  $U(s)$ 는 각각 오차, 제어기 출력, 제어대상의 입력신호를 나타낸다. 또한  $K$ ,  $\tau$ ,  $L$ 은 제어대상의 정상이득, 시정수, 시간지연을  $K_p$ ,  $\tau_i$ ,  $\tau_d$ 는 PID 제어기의 비례이득(Proportional gain), 적분시간(Integral time), 미분시간(Derivative time)을 의미한다.

우수한 제어성능을 보장하기 위하여 제어기의 세 계수는 제어대상의 동특성에 따라 적절히 조정되어야 한다. PID 제어기는 설정치 추종성능을 개선하거나 또는 외란 억제성능을 개선하기 위해서 사용될 수 있다. 기존의 연구에서는 설정치 추종성능을 개선하기 위한 일련의 방법을 제시하였다[6]. 본 연구에서는 기존의 연구에 덧붙여 외란제거용 PID 제어기의 동조규칙을 얻는 것이 목적이므로 설정치는 제어시간동안 고정되는 것(일반성을 잃지 않는 한 0으로 간주)으로 가정한다.

그림 2.1에서 보듯이 외란은 제어시스템의 내부로 들어오는 것으로서, 시스템의 출력이 설정치로부터 벗어나게 하는 원인을 제공하므로 설계 시 항상 고려되어야 할 요소이다. 일반적으로 외란은 저주파수 특성을 가지는데, 시스템 자체의 저역대역필터(Low-pass filter) 특성으로 인해 더욱 저주파 특성을 보이기도 한다. 문헌에는 자주 계단입력 형태의 외란이 고려되므로, 본 연구에서도 외란은 계단상으로 변동하는 것으로 간주한다.

(2.1)과 (2.2)로부터 오차  $E(s)$ 를  $R(s)$ 와  $D(s)$ 의 함수로 표시하면

$$\begin{aligned}
E(s) &= \frac{1}{1+G_c(s)G_p(s)}R(s) - \frac{G_p(s)}{1+G_c(s)G_p(s)}D(s) \\
&= \frac{\tau_i\tau s^2 + \tau_i s}{A(s)}R(s) - \frac{K\tau_i\tau s^2 + K\tau_i s}{B(s)}D(s)
\end{aligned} \tag{2.3}$$

단,

$$A(s) = (KK_p\tau_i\tau_d + \tau\tau_i)s^2 + KK_p\tau_i s + KK_p \tag{2.4}$$

$$\begin{aligned}
B(s) &= (KK_p\tau_i\tau_d\tau + \tau_i\tau^2)s^3 + (KK_p\tau_i\tau + KK_p\tau_i\tau_d + 2\tau_i\tau)s^2 \\
&\quad + (KK_p\tau_i + \tau_i + KK_p\tau)s + KK_p
\end{aligned} \tag{2.5}$$

를 얻을 수 있고, 최종치 정리에 의해  $\lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = 0$ 이 되므로 가정한 설정치와 외란에 대하여 PID 제어시스템은 정상편차가 발생되지 않음을 알 수 있다.

## 2.2 기존의 동조규칙

PID제어기의 동조는 제어기 응용 초기부터 연구 대상이 되어온 중요한 문제로 여러 가지의 동조 기법이 개발되었고, 동조 방법도 매우 다양하며 또 그 방법에 따라 파라미터 값도 조금씩 다르다.

### 2.2.1. Ziegler-Nichols 동조법

이 방법은 1942년 Ziegler와 Nichols가 플랜트 변화에 따른 P, I, D 계수의 최적 설정기법을 감도 영향을 고려하면서 체계적으로 완성한 동조법이다. 지금까지도 변수 모델로 공정을 특성화하지 않는 장점 때문에 대부분의 PID 제어기 설계 시 기본적으로 이용되고 있다. 동조 방법을 크게 구분하면 오프라인 상에서 수행하는 개루프 방식과 제어기를 제어대상에 장착한 상태에서 수행하

는 페루프 방식이 있다.

(1) 개루프법

제어기를 개루프 상태에서 제어량의 변화 상태를 보면서 정상이득(Gain)  $K$ , 시정수(Time constant)  $\tau$ , 지연시간(Time delay)  $L$ 을 얻고 이를 토대로 PID 제어기의 계수를 동조하는 기법이다. 그림 2.2는 개회로 제어시스템의 단위계단 입력에 대한 응답곡선으로부터  $K$ ,  $\tau$ ,  $L$ 을 구하는 것을 보여준다. 이 때 구해진 값과 표 2.1를 이용해 계수를 구한다.

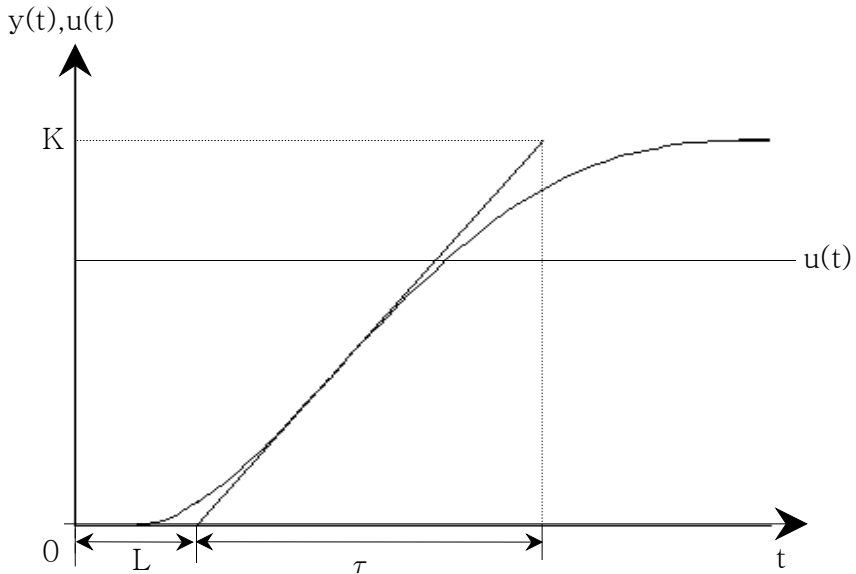


그림 2.2 계단입력에 대한 응답곡선

Fig. 2.2 Response curve for the unit step input

표 2.1 개루프법에 의한 PID 동조규칙

Table 2.1 PID tuning rule by the open-loop method

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

개루프법은 개회로 제어시스템의 단위계단 입력에 대한 응답곡선으로부터 정확한 정상이득과 시정수, 및 시간지연 상수 등을 구하기가 어려우며 상당한 현장경험이 요구되고, 운전원에 따라 성능 결과가 다르다.

(2) 페루프법

비레이득을 갖는 폐회로 시스템에 비례 요소를 페루프에 넣고, 출력  $Y(t)$ 가 한계 진동할 때까지 비레이득을 증가시켜 한계주기와 한계이득을 얻은 다음 PID 제어기의 파라미터를 동조하는 기법이다. 그림 2.3은 비레이득을 갖는 폐회로 제어시스템을 보여주고 있다.

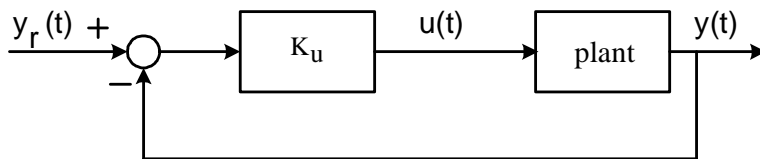


그림2.3 비레이득을 갖는 폐회로 제어시스템

Fig. 2.3 Closed-loop control system with proportional gain

한계 진동할 때의 비례계수를 한계이득  $K_u$ , 응답곡선의 한계주기를  $T_u$ 라고 한다. 그림 2.4의 응답곡선으로부터  $T_u$ 를 구한 후, 표 2.2를 이용해 계수를 구한다.

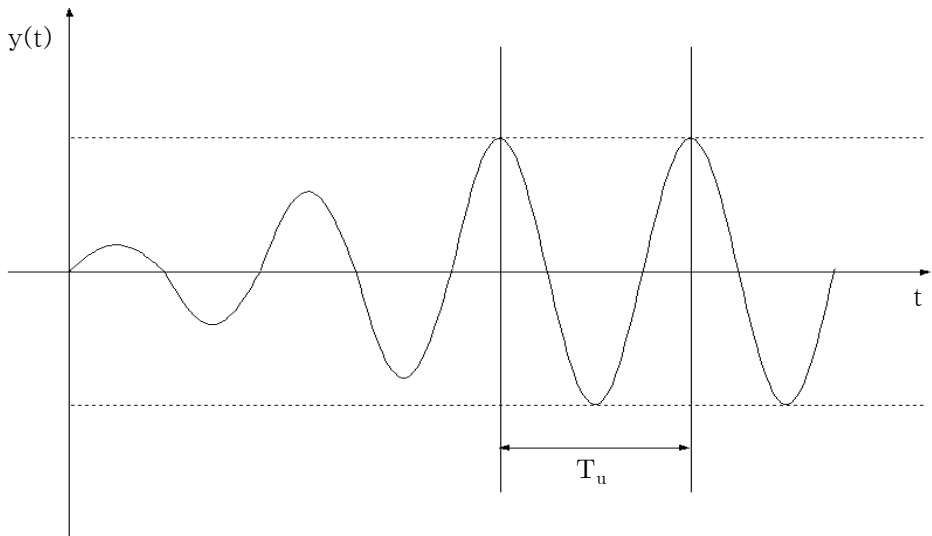


그림 2.4 응답곡선과 한계주기

Fig. 2.4 Response curve and ultimate period

표 2.2 페루프법에 의한 PID 동조규칙

Table 2.2 PID tuning rule by the closed-loop method

Parameter Controller	$K_p$	$\tau_i$	$\tau_d$
PI	0.45 $K_u$	0.83 $T_u$	
PID	0.6 $K_u$	0.5 $T_u$	0.125 $T_u$

페루프법은 공정 이득의 안정도를 유지하는 수준에서 제어해야 하고, 많은 시행착오에 의해 한계이득과 한계주기에서 페루프 이득을 얻기 때문에 시간을 많이 소비되는 단점이 있다. 또한 실제의 플랜트에서 안정한계까지 진동을 계속 한다는 것은 쉽지 않다.

### 2.2.2 Cohen-Coon 동조법

이 동조방법은 그림 2.5와 같이 플랜트의 개루프 응답곡선으로부터 PID 파라미터를 기울기가 가장 큰 변곡점에서 접선을 그어서 시간 축과 접선의 교차점을 찾아내고, 이들 값으로부터 도형적으로 결정한다. 시간 축과 접선의 교차점에서 시간지연 상수를 측정하고, 그리고 기울기가 가장 큰 시점과 교차점 사이의 간격을 시정수로 측정한다. 이는 Ziegler-Nichols 방법에 비해 편리한 방법으로 인정되지만 추정 모델 함수를 구하기 위해 정확한 기울기를 결정해야 하는 난점이 있다.

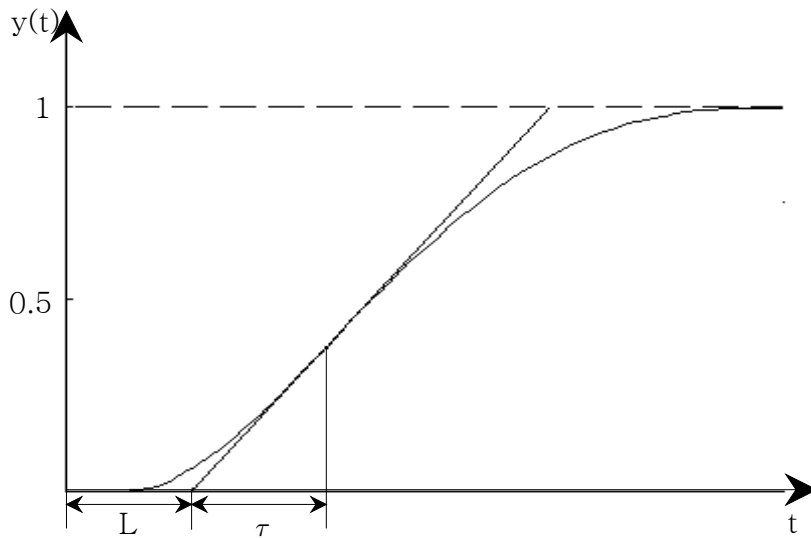


그림 2.5 인디셜 응답곡선

Fig. 2.5 Response curve for the unit step input

그림 2.5와 같은 인디셜 응답곡선을 통해서 구한 PID 제어기의 각 파라미터는 표 2.3과 같다.

표 2.3 Cohen-Coon 법에 의한 PID 동조규칙

Table 2.3 PID tuning rule by the Cohen-Coon method

Parameter Controller	$K_p$	$\tau_i$	$\tau_d$
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

폐루프 내에 공칭모델을 포함하여 플랜트와 모델간의 오차를 케환하여 새로운 제어입력을 만드는 방법이다. 이 방법은 플랜트와 모델간의 모델링 오차를 보상할 수 있는 유용한 방법이지만, 사용되는 모델은 일반적으로 플랜트보다 저차이며 플랜트의 불안정한 성분을 포함해야 한다는 제한조건이 있다. 표 2.4는 IMC 동조법을 나타낸 것이다.

표 2.4 IMC 법에 의한 PID 동조규칙

Table 2.4 PID tuning rules by the IMC method

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

이때 너무 작은  $\lambda$ 를 사용하게 되면 빠른 응답을 얻을 수 있으나 진동하거나 불안정해질 수 있다. 대개 PI 제어기의 경우  $\lambda \geq 1.7L$ 을, PID 제어기의 경우  $\lambda \geq 0.25L$ 을 사용한다.

### 2.2.4 Lopez ITAE 동조법

(2.1)의 시간지연을 갖는 1차 모델과 계단상의 외란에 대해 시간곱 절대오차 적분(ITAE)의 성능지수를 최소로 하도록 PID 제어기의 계수를 결정하는 방법이다.

$$ITAE = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (2.6)$$

시뮬레이션에 의해  $\frac{\tau}{L}$  을 1에서 20까지 변화시키고  $a(\frac{\tau}{L})^b$  로 주어지는 식에 대해 최소자승법으로 a, b를 구한다. 표 2.5는 Lopez ITAE 법[8]에 의한 PID 동조규칙을 보여준다.

표 2.5 Lopez ITAE 법에 의한 PID 동조규칙

Table 2.5 PID tuning rule by the Lopez ITAE method

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

## 제 3 장 최적화 도구로서의 RCGA

앞 장에서는 PID 제어시스템의 구성과 기존의 동조규칙을 살펴보았다. 본 장에서는 새로운 외란제거용 PID 동조규칙을 제안하기 위해 최적화 문제가 수반되므로 이를 해결하기 위해 실수코딩 유전알고리즘(Real-coded genetic algorithm: RCGA)을 사용하므로 이에 대해 살펴본다.

### 3.1 유전알고리즘

먼저 최적화 도구로서의 유전알고리즘의 원리에 대해 간단히 살펴본다.

#### 3.1.1 유전알고리즘의 원리

자연계 생물들은 그들의 유전자를 보존하고 생존을 지키기 위해 자손을 생산하고, 끊임없이 환경과 투쟁하며 적응해 가는 일련의 과정은 주어진 환경에서 최선이라는 사실에 입각하여 유전학과 진화원리를 컴퓨터 알고리즘과 결합시키는 가능성을 연구하여 왔다.

유전알고리즘은 두 부모의 유전자들로부터 그들 자손의 유전자를 형성하는 유성생식과 자연환경에서 일어나는 진화원리를 흉내 내고 있다. 이러한 과정이 문제 해결에 이용될 때, 기본적으로 요구되는 전제는 인위적인 진화현상을 일으킬 초기 집단을 구성하는 것이다. 집단은 문제 공간상에서 잠정적인 해를 뜻하는 다수의 개체로 형성되고 이들은 유전자의 역할을 반영하도록 흔히 비트스트링 형태로 표현된다. 이 집단은 유성생식과 진화 원리를 모방한 유전 연산자에 의해 점진적으로 개선되게 된다. 각 개체는 집단의 구성원으로서 더 적합하고 덜 적합한 어떤 특징을 가지고 있기 때문에 적합도 함수에 의해 계량화 될 수 있다. 따라서 적합도 값이 큰 개체들은 더 많이 선택된다. 선택된 개체들 간의 유전정보가 교환되고, 무작위적인 유전자 변경이 도입됨으로써 다음 세대의

집단이 형성된다.

### 3.1.2 탐색 절차

유전알고리즘은 진화 원리를 컴퓨터 알고리즘과 접목시켜 매우 복잡한 최적화 문제를 다룰 수 있는 메커니즘을 제공함으로써 신호처리, 시스템 식별 및 제어, 신경회로망의 설계 및 학습, VLSI 설계, TSP 및 작업 스케줄링 등 여러 분야에 응용되어 왔다[9]. GA의 탐색과정은 크게 초기화, 적합도 평가, 재생산, 교배, 돌연변이의 5단계로 구분된다[10].

초기화 단계에서는 주어진 문제의 해가 될 가능성이 있는 개체들의 집단이 형성된다. 다음 단계에서 개체들은 복호화 되어 목적함수를 제공하고 이로부터 적합도가 계산된다. 개체들의 상대적인 적합도 값에 따라 현재 집단 내의 개체들이 재생산을 위해 선택된다. 일반적으로 성능이 좋은 개체들은 더 많이 선택되고 성능이 나쁜 개체들은 집단으로부터 소멸된다. 선택된 개체들은 교배를 통해 서로 간에 유전정보를 교환함으로써 집단에 새로운 개체를 도입하게 된다. 마지막으로 돌연변이를 통해 개체의 유전정보를 임의로 변경하여 집단에 새로운 정보를 도입한다. 이렇게 해서 새롭게 형성된 집단은 최적의 해가 발견 될 때까지 적합도 평가, 재생산, 교배, 돌연변이 연산을 반복하게 된다.

그림 3.1은 유전알고리즘의 기본 구조를 보여주고 있다.

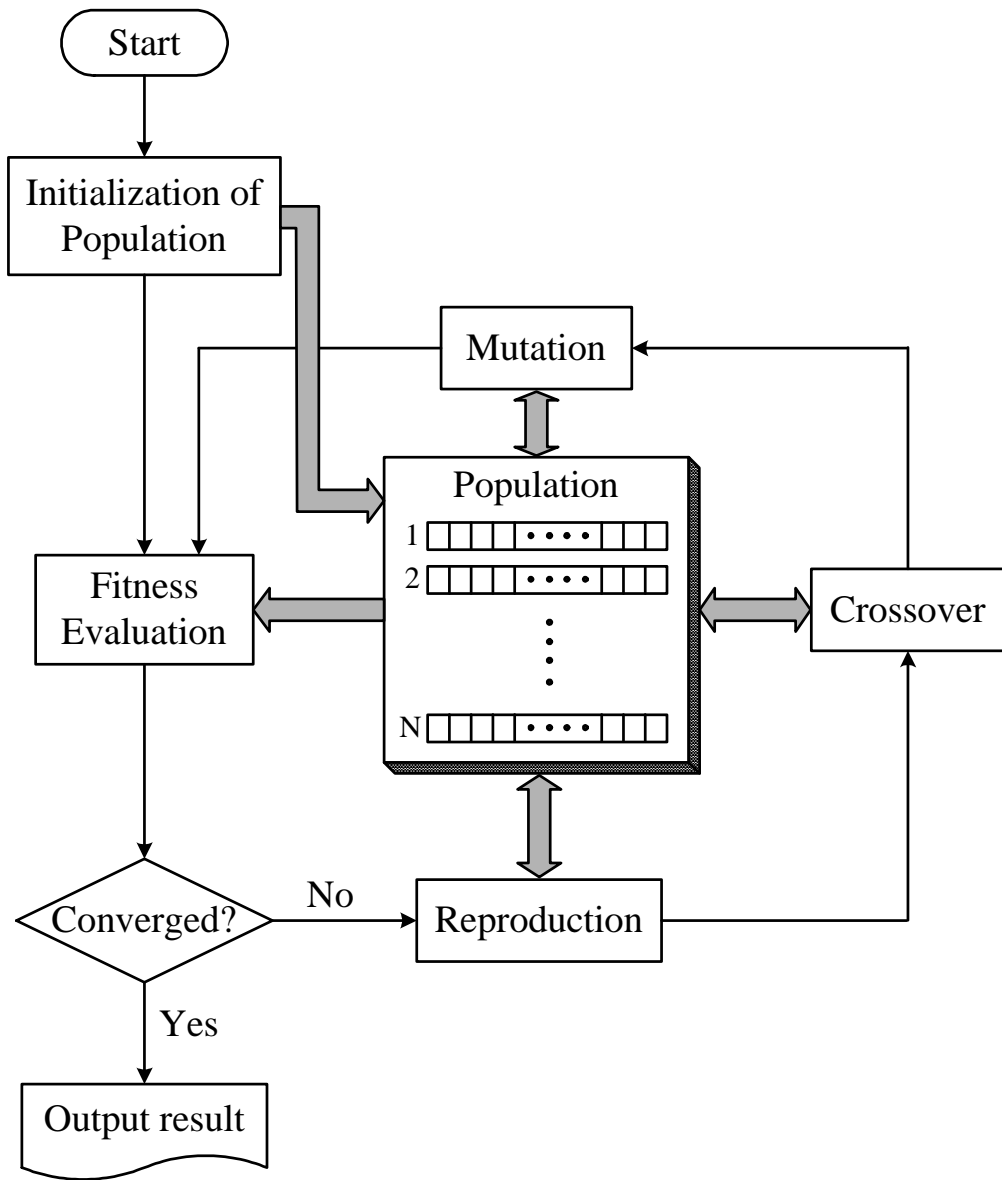


그림 3.1 유전알고리즘의 구조

Fig. 3.1 Structure of a genetic algorithm

### 3.1.3 유전알고리즘의 특징

유전 알고리즘은 자연 진화를 모방하고 있다는 사실 외에도 기존의 탐색 알고리즘과 구분 되는 몇 가지 특징을 가지고 있는데 다음과 같다.

- 1) 문제의 파라미터를 직접 이용하기 보다는 이를 적절히 기호로 표현하여 이용한다.
- 2) 하나의 해를 다루기보다는 집단을 취급한다.
- 3) 이득함수 또는 목적 함수 값만을 필요로 하고 연속성, 미분가능성, 단봉 등과 같은 다른 보조 정보를 요구하지 않는다.
- 4) 유전 연산자들을 사용한다.
- 5) 얻어진 결과는 결정적이기 보다는 확률적이다.

이 외에도 유전 알고리즘은 매우 복잡하고 규모가 큰 탐색 공간에서도 원만히 동작하며, 목적함수를 선택하는데 있어서도 매우 유연하다. 다시 말하면 다봉의 특징을 가지는 탐색환경에서도 전역해를 얻을 수 있고, 구배에 기초한 기존의 방법들이 도함수를 쉽게 얻을 수 있는 제곱오차의 적분(Integral of the square of the error : ISE)을 목적함수로 취하지만, 유전알고리즘은 절대오차의 적분(Integral of the absolute magnitude of the error : IAE), 시간곱 절대오차의 적분(Integral of the time-multiplied absolute magnitude of the error : ITAE) 등과 같이 어떤 형태의 함수도 목적 함수로 쉽게 이용할 수 있다.

이러한 특징 때문에 유전 알고리즘은 함수의 최적화, 자원배분, 스케줄링, 운송문제, 순회판매원 문제, 시스템 제어 및 식별, 신경 회로망의 학습법 등 다양한 분야에서 폭 넓게 응용되고 있다.

## 3.2 RCGA

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

따라서 본 논문에서는 실수코딩 염색체를 채용하는 RCGA를 이용한다. 실수 코딩이 선호되는 이유를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 변수(표현형)와 유전자(유전자형)간에 일대일 일치로 프로그래밍이 간편해지고, 이진코딩 유전알고리즘(Binary-coded genetic algorithm : BCGA)에서 요구되는 부호화, 복호화 프로세스가 필요 없게 되어 탐색속도를 높일 수 있다.
- 2) 지역동조를 통해 해의 정밀도를 개선할 수 있다. BCGA에서는 해밍절벽(Hamming cliff) 때문에 지역동조가 어렵지만 RCGA에서는 더 적합하고 빠른 방법으로 동조가 일어나도록 해주는 불균등돌연변이와 같은 연산자가 있다.
- 3) 해에 관한 사전지식이 없는 경우에는 매우 큰 정의영역을 정하는 것도 가능하다.
- 4) 직관적으로 문제공간과 가깝고 관련된 지식을 포함시키는 특별한 연산자들의 구현이 용이하다.
- 5) 문제영역과 가까우므로 복잡한 제약조건을 다루기 위한 도구를 설계하는 것이 쉬워진다.

### 3.2.1 기본 유전 연산자

유전 알고리즘의 핵심은 무엇보다도 자연의 진화원리를 알고리즘 형태로 나

타낸 기본 유전 연산자(Basic genetic operator)라 할 수 있다. 대부분의 유전알고리즘들은 재생산, 교배, 돌연변이 연산자를 포함시키고 있다.

### 1) 재생산(Reproduction)

재생산은 자연계의 적자생존의 현상을 모방하여 각 개체의 적합도에 따라 개체를 선택하여 새로운 집단을 형성하는 과정을 말한다. 이러한 선택은 약한 개체들을 집단에서 몰아내고 강한 개체를 선택함으로써 유전자들이 이후 세대의 집단에 넓게 퍼지도록 하여 전체집단을 더욱 강하게 해주는 특징을 가진다.

재생산 알고리즘으로는 룰렛 휠선택(Roulette wheel selection), 순위에 기초한 선택(Ranking-based selection), 토너먼트선택(Tournament selection) 등이 있다.

본 논문에서는 구배와 유사한 재생산[10,11]을 사용한다. 이 연산자에 의하면 집단 내 개체들은 자신과 최적 개체와의 정규화된 적합도 차이와, 자신과 최적 개체와의 벡터 차의 상수 곱에 따라 변경되어 새롭게 재생산되는데, 궁극적으로 집단 내 모든 개체들을 현 세대의 최적 개체 쪽으로 끌어 모으려는 방향으로 연산한다.

### 2) 교배(Crossover)

자연계 생물들의 개체 증식은 부모 세대의 성적결합 즉, 교배를 통해 이행되며 이를 통해 서로간의 유전자를 교환 하게 된다. 유전알고리즘에서도 개체간의 정보교환을 통해 새로운 점을 탐색하기 위하여 교배급원으로부터 부모염색체 쌍을 임의로 선택하고, 교배점 이후의 비트들을 서로 교환 결합함으로써 자손을 생성한다.

교배는 염색체간에 정보를 교환하기 위한 메커니즘으로서 이를 구현하는 연산자는 근본적으로 코딩 법에 종속될 수밖에 없다. RCGA에서는 단순교배, 산술적교배, 수정단순교배, 플랫폼교배 등이 사용된다. 본 논문에서는 수정단순교배 [10,11]를 사용하였다. 이것은 이진코딩의 일점교배를 아주 근접하게 묘사한 연



산자이다. 두 염색체에 대해 교배점  $j \in [1, N-1]$  이 무작위로 선택되면  $j$ 번째 때 요소는 식으로 일차 결합되고 그 후의 요소들은 서로 교환되어 자손이 생산된다.

### 3) 돌연변이(Mutation)

모의진화가 계속되는 동안 재생산과 교배 연산자는 집단을 더욱 강하게 해주고, 이로 인하여 염색체들은 서로 닮아가게 된다. 이러한 현상은 세대 말기에는 바람직하지만 세대 초기에 발생하게 되면 유전자의 다양성 결핍으로 지역해(Local solution)나 사점(Dead corner)에 빠지게 되는 요인이 된다. 집단 내에서 염색체들의 특정위치 비트(Bit)가 모두 같게 되면 재생산과 교배 연산자는 이를 변경할 수 없게 된다. 이러한 원치 않는 해로부터 벗어나기 위해 돌연변이를 사용한다. 이렇게 함으로써 초기 세대에서 모든 염색체의 특정 비트가 고정되는 것을 방지해주고 또한 탐색 영역을 확대해주기도 한다. RCGA에서는 균등 돌연변이, 경계돌연변이, 동적돌연변이 등이 사용가능하다.

본 논문에서는 동적 돌연변이(Dynamic mutation)[10,11]를 사용하였다. 일명 불균등돌연변이(Non-uniform mutation)라고도 불리우는 이 연산자는 정밀도를 높이기 위하여 미세 조정이 가능하도록 고안된 것이다.  $j$ 번째 유전자에서 돌연변이가 일어나면  $x_j$ 는 (3.1)로부터 결정된다.

$$x_j = \begin{cases} X_j' + \Delta(k, x_j^{(u)} - x_j'), & \tau = 0 \text{ 일 때} \\ X_j' - \Delta(k, x_j' - x_j^{(L)}), & \tau = 1 \text{ 일 때} \end{cases} \quad (3.1)$$

여기서  $\tau$ 는 0 또는 1 둘 중에서 하나를 취하는 난수이다

### 3.2.2 적합도 평가(Fitness evaluation)

자연계에서 생물들은 끊임없이 환경에 적응해 가는데 한 생물의 적응능력은

그 환경에 대한 적합도(Fitness)를 반영한다. 이 적응능력이 유전알고리즘에서는 개체의 적합도를 평가하는 과정을 통해 반영한다. 새로운 집단이 완성되고 개체들의 적합도가 목적함수에 의해 계산되며 적합도의 평가는 새로운 집단이 완성 될 때마다 계속된다. 이 과정에서 적합도가 큰 개체가 더 많은 보상을 받을 수 있도록 배려하기 위해서 적합도 함수는 최대화 문제 형태로 표현된다. 따라서 본 논문에서는 최소화 문제로 기술되는 목적함수는 (3.2)와 같이 사상된다.

$$f(s) = -F(x) - F_{\min} \quad (3.2)$$

여기서  $f(s)$ 는 적합도 함수,  $F(x)$ 는 목적함수,  $-F_{\min}$ 은  $f(s) \geq 0$  을 보장하는 상수이다.

만약 초기 세대의 집단에 초우량 개체가 출현하게 되면 기존의 재생산 연산자는 이 개체를 여러 번 복제하게 되고, 그 결과 이들이 집단을 지배하게 되어 지역 최적점으로 급히 수렴하게 된다. 이와 반대로 후기 세대에는 집단이 강해지고, 개체들이 한 점 주위로 군집되면 좋은 개체와 더 나은 개체를 구별하는 것이 쉽지 않게 된다. 그러므로 초기에는 유전자의 다양성을 충분히 유지할 수 있도록 개체간의 상대적인 적합도의 영향을 줄여주고, 후기에는 그 영향이 커지게 해줄 필요가 있다. 따라서 본 논문은 초기 세대에서는 우량 개체의 적합도 영향을 줄일 수 있도록 개체들의 적합도 값을 넓은 범위의 값 위로 분포시키고, 후기 세대에는 더 적합한 개체들의 더 많이 선택될 수 있도록 분포시키는 선형스케일링(Linear scaling)을 사용한다.

또한 최적 개체가 다음 세대로 소멸되지 않고 전달되는 것을 보장해 주는 엘리트 전략(Elitist strategy)[10,11]을 사용하였다.

## 제 4장 RCGA를 이용한 동조규칙의 유도

이 장에서는 앞 장에서 살펴본 RCGA를 이용하여 제어대상의 매개변수를 변경해가며 성능지수를 최소로 하는 외란억제용 PID 제어기의 최적 계수를 얻고, 이를 일반화하여 새로운 동조규칙을 얻는다.

### 4.1 PID 제어시스템의 무차원화

앞에서 잠시 언급하였듯이 본 연구의 최종 목적은 산업현장의 프로세스를 대상으로 외란제거용 PID 동조법을 얻는 것이다. (2.1)의 제어대상은 세 개의 파라미터를 가지고 있으므로 편의상 제어대상의 이득  $K$ 를 제어기와 함께 묶어 표시하고, 매개변수들을 무차원화하기 위해  $t' = \frac{t}{\tau}$  라 하면 주파수 영역에서는  $s' = \tau s$  인 관계가 성립된다. 따라서 2.1절에서 언급한 제어대상과 PID 제어기 수식은 (4.1), (4.2)와 같이 고쳐 쓸 수 있다

1) 제어대상

$$\begin{aligned} G_p(s') &= G_p(s) \Big|_{s = \frac{s'}{\tau}} \\ &= \frac{e^{-\frac{L}{\tau}s'}}{1+s'} \end{aligned} \quad (4.1)$$

2) PID 제어기

$$\begin{aligned} G_c(s') &= G_c(s) \Big|_{s = \frac{s'}{\tau}} \\ &= KK_p \left( 1 + \frac{1}{\frac{\tau_i}{\tau}s'} + \frac{\tau_d}{\tau}s' \right) \end{aligned} \quad (4.2)$$

이렇게 함으로써 제어대상은 매개변수  $\frac{L}{\tau}$  만의 함수로 간단히 표시되는 이 점을 가지게 된다. 이들을 라플라스 역변환하여 무차원의 시간영역으로 변환하면 다음과 같은 방정식을 얻게 된다.

1) 제어대상

$$\dot{y}(t') + y(t') = u(t' - \frac{L}{\tau}) \quad (4.3)$$

2) PID 제어기

$$u(t') = KK_p [e(t') + \frac{\tau}{\tau_i} \int_0^{t'} e(\tau) d\tau + \frac{\tau_d}{\tau} \frac{de(t')}{dt'}] \quad (4.4)$$

## 4.2 최적 PID 계수 집합 탐색

앞 절에서 구한 무차원 제어대상의 매개변수  $\frac{L}{\tau}$  를 변경해가며 최적의 계수 집합  $\{KK_p, \frac{\tau_i}{\tau}, \frac{\tau_d}{\tau}\}$  을 찾는다. 그림 4.1은 PID 제어를 최적 동조하는 블록선도를 보여준다.

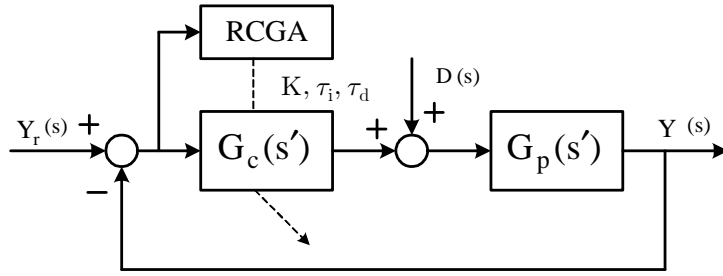


그림 4.1 RCGA를 이용한 PID제어기의 최적동조

Fig. 4.1 Optimal tuning of the PID controller using a RCGA

본 연구에서 설정치  $y_r(t)$ 는 일정하게 고정되므로 일반성을 잃지 않은 범위 내에서 0으로 간주하였고, 외란  $d(t)$ 는 계단상으로 변화는 것으로 간주한다. 제어기의 바람직한 역할은 외란이 없는 한 출력이 설정치에 일치하도록 제어입력을 만들어 내야하며, 외란이 있을 경우에는 변경된 출력이 가급적 빨리 회복되어 설정치 부근으로 되돌아오도록 하는 것이다.

제어기의 최적 성능은 세 가지 계수  $KK_p$ ,  $\frac{\tau_i}{\tau}$ ,  $\frac{\tau_d}{\tau}$ 를 어떻게 정하느냐에 따라 달라지게 된다. 이는 다 변수 최적화 문제로 여기서 발생하는 최적화 문제는 RCGA를 이용하여 해결한다. 실수코딩을 채용함으로써 RCGA의 염색체는 PID 제어기의 세 계수를 유전자로 가지게 된다. 집단 내 염색체들의 성능이 좋고 나쁨은 적합도 평가를 통해 계량되며, 적합도는 성능지수(목적함수)로부터 계산되어 진다. 본 연구에서는 제어환경에 따라 적절히 선택해서 사용할 수 있도록 ISE, IAE, ITAE 세 가지 성능지수를 고려하였다.

$$\text{ISE} : J_1 = \int_0^{t_f} e^2(t) dt \quad (4.5)$$

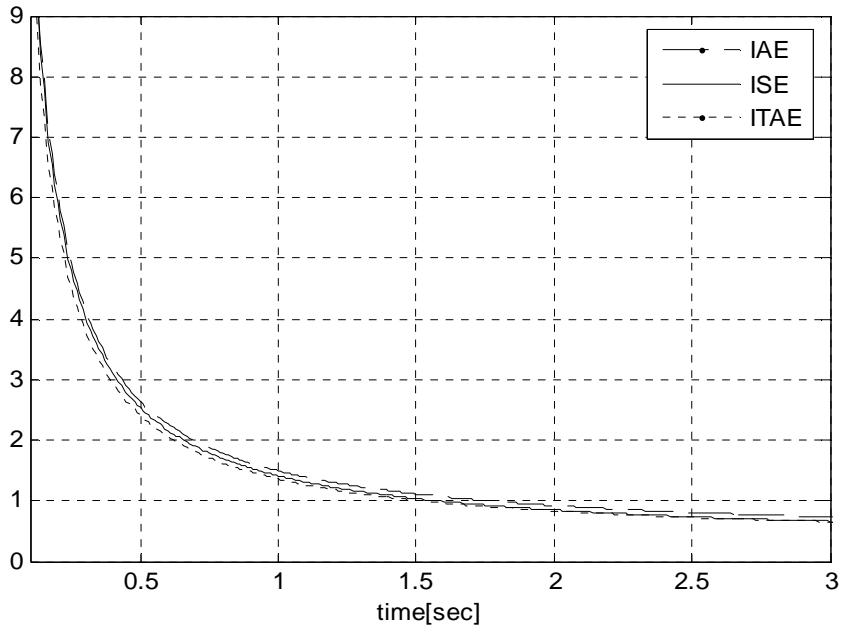
$$\text{IAE} : J_2 = \int_0^{t_f} |e(t)| dt \quad (4.6)$$

$$\text{ITAE} : J_3 = \int_0^{t_f} t |e(t)| dt \quad (4.7)$$

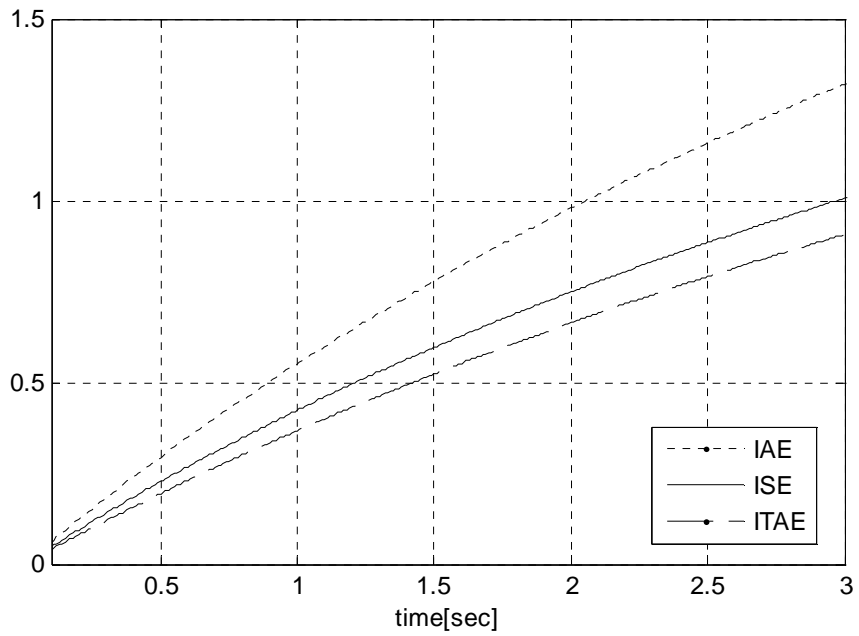
일반적으로 ISE는 해석이 용이하여 최적제어기 설계 등에 자주 이용되나 오차가 클 때는 큰 벌점을, 작을 때는 작은 벌점을 주는 결과를 초래해 최적해 부근에서 계수의 변화에 둔감하다. 한편 IAE는 오차의 절대 크기를 취함으로써 양이나 음의 오차에 균등한 벌점을 부여하는 효과를 주므로 ISE보다 나은 감도를 나타낸다. ITAE는 장시간의 과도현상에 대해 벌점을 주는 매우 유용한 기준으로 IAE나 ISE보다 훨씬 더 변별력이 있으며, 이 적분의 최소값은 시스템의 파라미터들이 변하는 경우에 훨씬 더 잘 정의될 수 있다.

$\frac{L}{r}$ 를 0 에서 3 사이에서 변화시키는 동안 설정치  $y_r$ 을 0으로 고정하고 단위 계단 외란( $d=1$ )을 투입하여 (4.5)에서 (4.7)의 성능지수를 계산하였고, 이때 시간  $t_f$ 는 이후의 적분 값이 무시되어도 좋을 만큼 충분히 크게 하였다. 한편 RCGA의 제어변수로 집단의 크기  $N=20$ , 재생산 계수  $P_r=1.7$ , 교배확률  $P_c=0.9$ , 돌연변이 확률  $P_m=0.05$ 로 하였다.

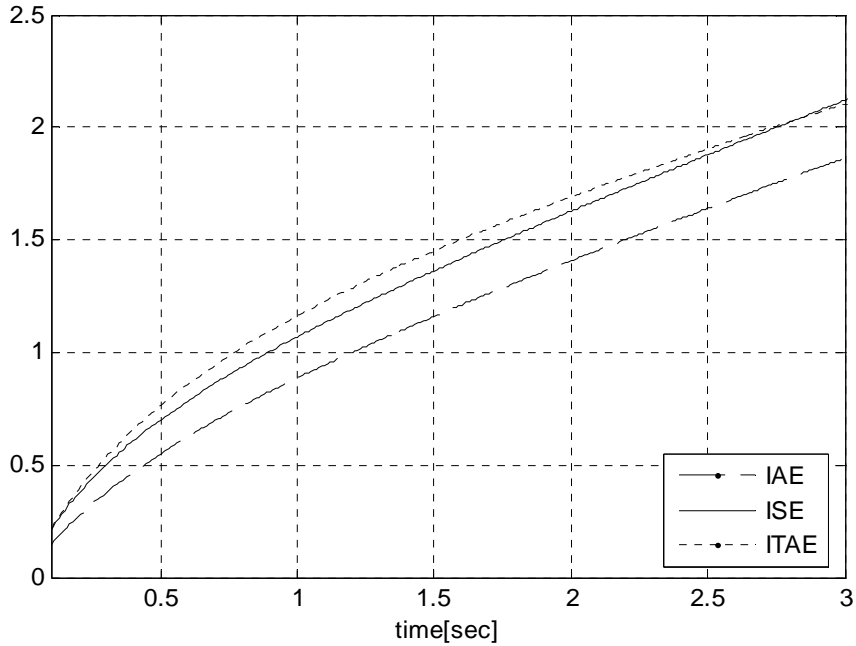
그림 3.3은 세 가지 성능지수에 대해 최적 계수를 구해 그린 것이다. 계산된 모든 값들은 독립된 씨드(Seed)로 프로그램을 5번 실행하고 평균한 결과 값이다.



(a)  $KK_p$



(b)  $\frac{\tau_i}{\tau}$



(c)  $\frac{\tau_d}{\tau}$

그림 4.2 외란 제거용 최적 PID 계수

Fig. 4.2 Optimal PID parameters for disturbance rejection

그림 4.2를 보면  $KK_p$ 는  $\frac{L}{\tau}$ 에 반비례하며 점점 감소해가는 경향을 보이고,  $\frac{\tau_i}{\tau}$ 와  $\frac{\tau_d}{\tau}$ 는  $\frac{L}{\tau}$ 에 비례해서 증가하는 모양을 보이고 있다.

### 4.3 동조규칙의 유도

여기서는 앞 절에서 구한 세 가지 성능지수 값을 최소로 하는 최적의 계수집합을 이용하여 그림 4.3의 블록선도로부터 새로운 동조규칙을 얻는다.



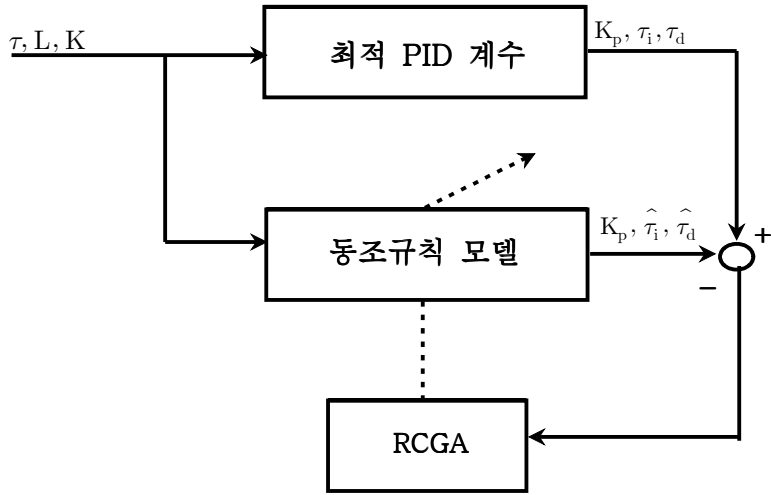


그림 4.3 RCGA를 이용한 동조규칙 모델의 계수조정

Fig.4.3 PID parameter tuning using a RCGA

$\frac{L}{\tau}$ 가 입력되는 동안 RCGA는 동조규칙 모델의 출력과 최적 계수값이 일치하도록 모델의 파라미터를 연속적으로 조정하게 된다. 사용된 동조규칙 모델은 문헌에 발표된 기준에 사용하고 있던 동조규칙들[2]-[4]을 참고하여 경험적으로 선택된 것이다.

여기서 발생하는 최적화 문제에도 RCGA를 적용하며, RCGA는 아래 성능지수가 최소가 되도록 모델의 파라미터를 조정한다.

$$J_0 = \sum_j |K K_p - K \hat{K}_p| \quad (4.8)$$

$$J_1 = \sum_j \left| \frac{\tau_i}{\tau} - \frac{\hat{\tau}_i}{\tau} \right| \quad (4.9)$$

$$J_2 = \sum_j \left| \frac{\tau_d}{\tau} - \frac{\widehat{\tau}_d}{\tau} \right| \quad (4.10)$$

이들 또한 최소화 문제이므로 적합도 함수는 (4.11)과 같이 정의된다.

$$f(s) = -J - F_{\min} (f(s) > 0) \quad (4.11)$$

문헌으로부터 찾을 수 있는 동조규칙 모델은 표 4.1과 같으나, 본 연구에서 김 등[7]의 연구결과를 토대로 새로운 동조규칙을 얻기 위해 사용된 모델은 표 4.2와 같다.

표4.1 기존의 동조규칙 모델

Table 4.1 Conventional tuning rule models

Type	Tuning rule models		
	$KK_p$	$\frac{\tau_i}{\tau}$	$\frac{\tau_d}{\tau}$
PID	$a_0 \left(\frac{\tau}{L}\right)^{a1}$	$a_0 + a_1 \frac{L}{\tau}$	$\frac{a_2}{a_0 + a_1 \left(\frac{L}{\tau}\right)^{-1}}$
	$a_0 + a_1 \frac{\tau}{L}$	$\frac{a_1 a_2 \frac{L}{\tau}}{1 + a_0 \left(\frac{L}{\tau}\right)^{-1}}$	$a_0 \left(\frac{L}{\tau}\right)^{a1}$
		$\frac{1}{a_0 - a_1 \frac{L}{\tau}}$	

표 4.2 사용된 동조규칙 모델

Table 4.2 Used tuning rule models

PID parameter	Tuning rule model
$KK_p$	$a_0\left(\frac{\tau}{L}\right)^{a_1}$
$\frac{\tau_i}{\tau}$	$\frac{b_1 b_2 \frac{L}{\tau}}{1 + b_0 \left(\frac{L}{\tau}\right)^{-1}}$
$\frac{\tau_d}{\tau}$	$\frac{c_2}{c_0 + c_1 \left(\frac{L}{\tau}\right)^{-1}}$

앞의 방법들로 구해진 각 성능지수에 최적화된 세 가지 새로운 동조규칙은 표 4.3과 같다. 표 4.3은 각각의 성능지수에 대해 독립된 씨드로 프로그램을 5 번 돌려 그 결과를 평균하여 얻은 결과이다. 만약 제어대상으로부터 매개변수  $K, \tau, L$  이 구해지면 이 규칙을 이용하여 PID 계수를 쉽게 구할 수 있다.

표4.3 외란제거용 PID 동조규칙

Table 4.3 PID tuning rules for disturbance rejection

Type	PID controller parameters		
	$KK_p$	$\frac{\tau_i}{\tau}$	$\frac{\tau_d}{\tau}$
ISE	$1.544\left(\frac{\tau}{L}\right)^{0.847}$	$\frac{1.033 + 0.406\left(\frac{L}{\tau}\right)}{1 + 0.624\left(\frac{L}{\tau}\right)^{-1}}$	$\frac{9.263}{2.122 + 14.676\left(\frac{L}{\tau}\right)^{-1}}$
IAE	$1.454\left(\frac{\tau}{L}\right)^{0.857}$	$\frac{1.092 + 0.446\left(\frac{L}{\tau}\right)}{1 + 0.438\left(\frac{L}{\tau}\right)^{-1}}$	$\frac{7.392}{2.293 + 15.157\left(\frac{L}{\tau}\right)^{-1}}$
ITAE	$1.396\left(\frac{\tau}{L}\right)^{0.846}$	$\frac{1.619 + 0.316\left(\frac{L}{\tau}\right)}{1 + 0.664\left(\frac{L}{\tau}\right)^{-1}}$	$\frac{6.503}{1.903 + 15.796\left(\frac{L}{\tau}\right)^{-1}}$

## 제 5 장 시뮬레이션 및 검토

이제까지는 세 가지 성능지수를 고려하고 각각에 대해 외란제거용 최적의 PID 동조규칙을 얻었다. 제안한 새로운 동조규칙의 효용성을 입증하기 위해 시뮬레이션을 실시하였고, Z-N 개루프법(Z-N법), Lopez의 외란제거용 동조법(L-ITAE법)과 함께 응답을 비교하였다. 제어대상 시스템으로는 문헌에 자주 인용되는 고차 시간지연을 가지는 모델을 사용하였다.

고차의 제어대상으로부터 시간지연을 갖는 1차 모델의 매개변수를 얻는 작업에는 유전알고리즘을 이용한 연속시스템의 온라인 파라미터 추정법[12]을 적용하였다. 이때  $K, \tau, L$ 은 각각 구간  $0 \leq K \leq 50, 0 \leq \tau \leq 50, 0 \leq L \leq 10$ 에서 탐색되었고, 샘플링 시간은  $h = 0.01$ 초로 하였다. 각 방법의 응답을 정량적으로 비교하기 위하여 단위계단 외란이 투입될 때 교란된 응답의 첨두값(Perturbation peak)을  $M_{pk}$ , 이 첨두값에 도달하는 데 걸리는 시간을  $t_{pk}$ , 교란된 응답이 설정치의 2% 내의 범위로 회복되는 시간을  $t_{ry}$ 로 정의하고 사용하였다. 일반적으로 유전알고리즘으로부터 얻어지는 해의 정도와 수렴속도는 초기집단의 선택에 따라 달라지므로 이를 배제하기 위하여 각 예제에서는 독립된 씨드로 생성된 초기집단을 이용해서 각 10회의 모의실험을 행하고, 여기서 얻은 결과를 평균하여 추정치로 사용하였다.

### 5.1 예제1

첫 번째 예제로 시간지연을 갖는 3차 시스템을 고려하였다.

$$\text{시스템 I: } G_p(s) = \frac{e^{-s}}{(1+s)(1+2s)(1+0.5s)} \quad (5.1)$$

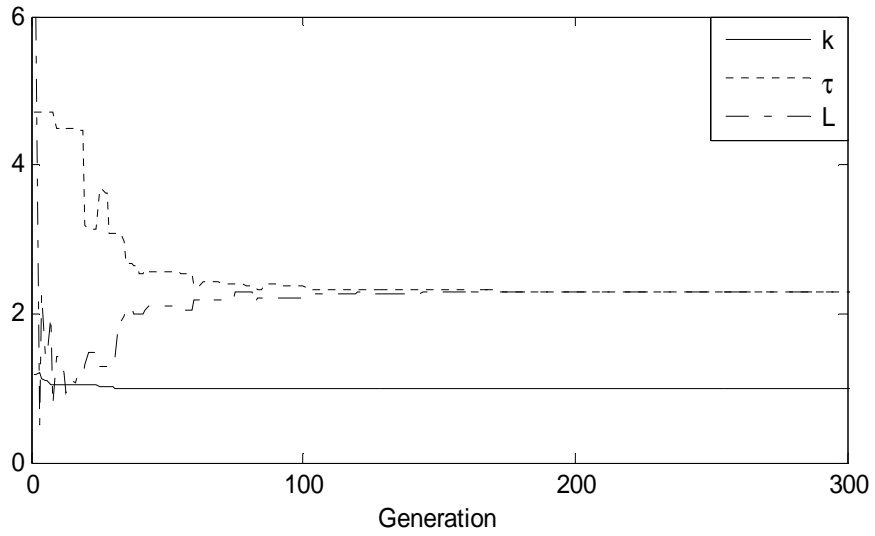
### 5.1.1 시스템의 근사화

시스템 I을 (2.1)의 제어대상과 같은 형태를 얻기 위해 RCGA를 이용해 근사화 작업을 하였다. 파라미터들은 각각  $0 \leq K \leq 50$ ,  $0 \leq \tau \leq 50$ ,  $0 \leq L \leq 10$ 의 구간에서 탐색되었다. 이때 샘플링 시간은  $h = 0.01$ 초 이었다. 그림 5.1은 RCGA가 모델의 파라미터를 탐색하는 과정을 보여준다.

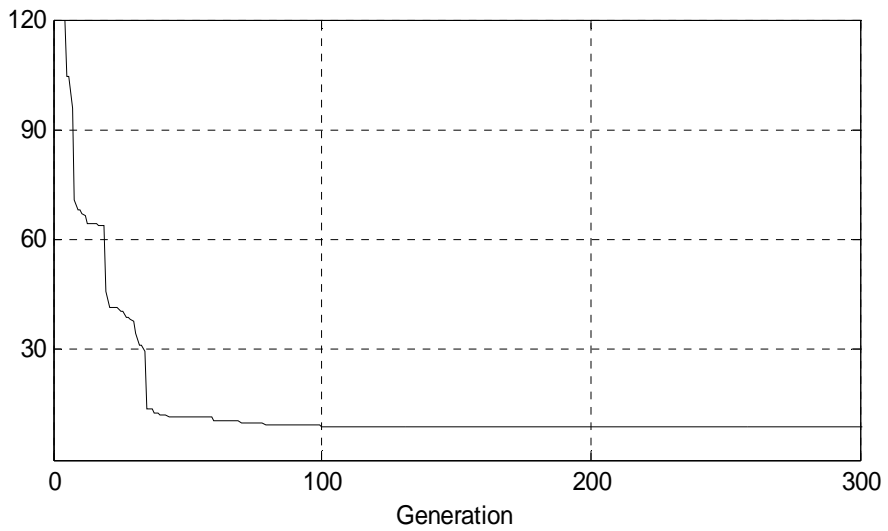
시뮬레이션 결과  $K = 1.001$ ,  $\tau = 2.306$ ,  $L = 2.32$ 를 얻을 수 있고, 시스템 I의 경우  $\frac{L}{\tau} = 1$ 로써 시간지연과 시정수가 비슷한 시스템임을 알 수 있다. 이를 (2.1)의 형태로 표현하면 (5.2)와 같다.

$$G_m(s) = \frac{1.001e^{-2.32s}}{1 + 2.306s} \quad (5.2)$$

그림 5.2는 원래의 시스템과 1차 시스템으로 근사화한 모델에 단위계단 응답을 입력했을 때 출력을 그린 것이다. 이 그림으로부터 근사화한 모델은 시스템과 거의 일치함을 확인 할 수 있다



(a) Parameters



(b) Objective function

그림 5.1 모델 파라미터의 진화적 탐색

Fig. 5.1 Evolutionary search of the model parameters

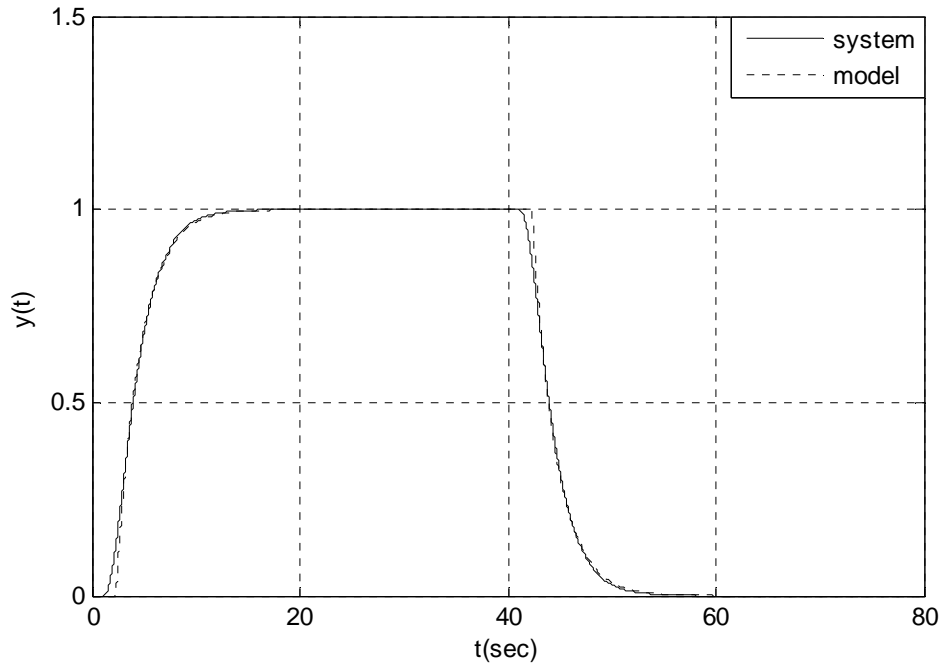


그림 5.2 추정된 모델의 검증

Fig. 5.2 Verification of the estimated model

### 5.1.2 PID 제어기의 응답비교

근사모델로부터의 기존의 동조규칙 방법들의 계수들을 살펴보면 Z-N법은  $K_P = 3.071$ ,  $\tau_i = 3.500$ ,  $\tau_d = 0.875$ , L-ITAE법은  $K_P = 1.349$ ,  $\tau_i = 2.751$ ,  $\tau_d = 0.383$ 이다. Fig. 5는 40초간 기존의 방법과 제안한 방법들의 외란 제거능력을 비교한 그림이다. 표 5.1은 각 방법의  $M_{pk}$ ,  $t_{pk}$ ,  $t_{ry}$ 를 구한 것이다.



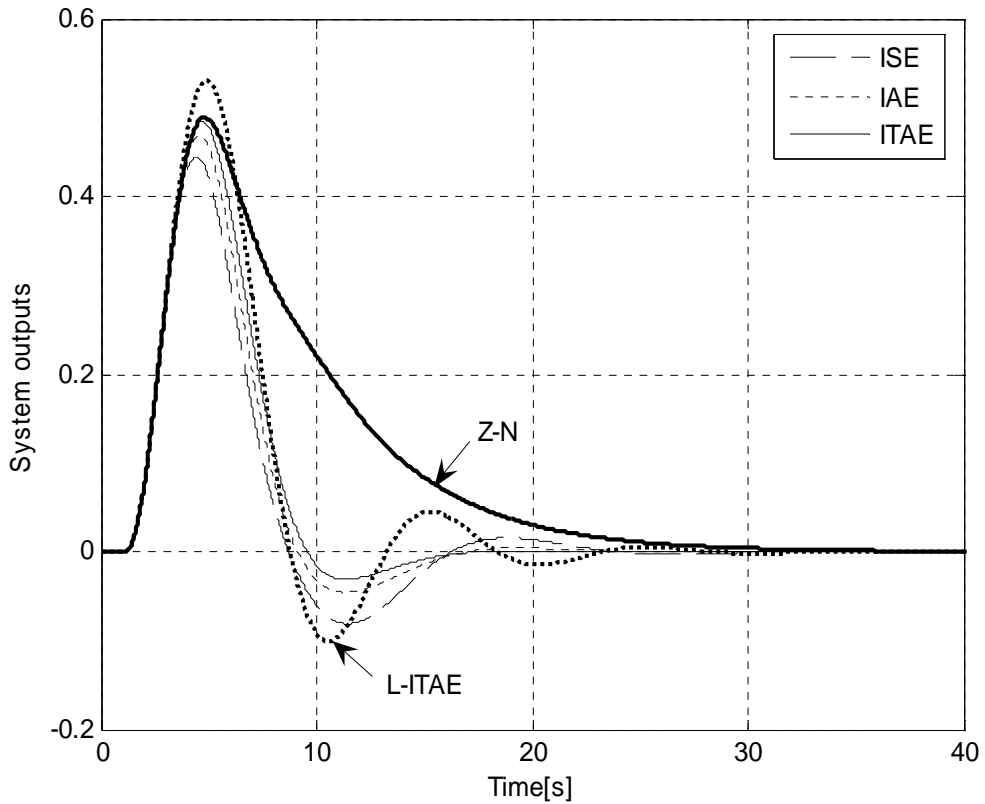


그림 5.3 시스템 I의 PID제어기의 응답 비교

Fig. 5.3 Response comparison of the PID controllers for System I

표 5.1 시스템 I에 대한 성능 비교

Table 5.1 Performance comparison for System I

Performance Tuning rule	$M_{pk}$	$t_{pk}$	$t_{ry}$
GA-ISE	0.44	4.44	15.11
GA-IAE	0.47	4.58	14.47
GA-ITAE	0.48	4.69	13.38
Z-N	0.49	4.80	20.06
L-ITAE	0.53	4.91	17.30

외란에 의해 교란된 응답들은 시간이 경과됨에 따라 모두 설정치 값에 접근해 가지만 제안한 방법의 응답이 기존의 방법보다 더 양호함을 알 수 있다. 이는 표 5.1의 정량적인 비교치를 통해서도 확인할 수 있으며 제안한 방법 중에서  $M_{pk}$ ,  $t_{pk}$ 는 ISE, IAE, ITAE 순으로 작았고,  $t_{ry}$ 는 기대하듯이 ITAE, IAE, ISE 순으로 짧았다.

## 5.2 예 제2

다음은 시간지연이 다소 큰 3차 시스템을 고려하였다.

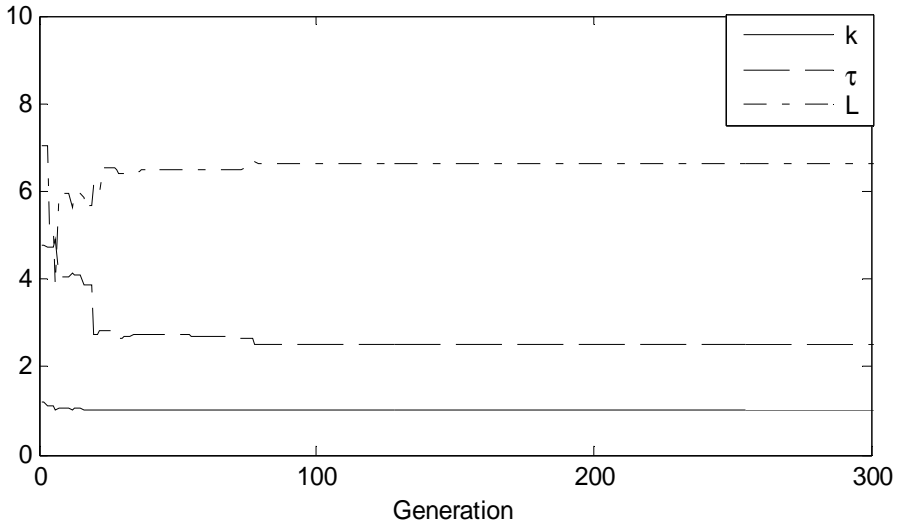
$$\text{시스템 II: } G_p(s) = \frac{e^{-5s}}{(1+s)^2(1+2s)} \quad (5.3)$$

### 5.2.1 시스템의 근사화

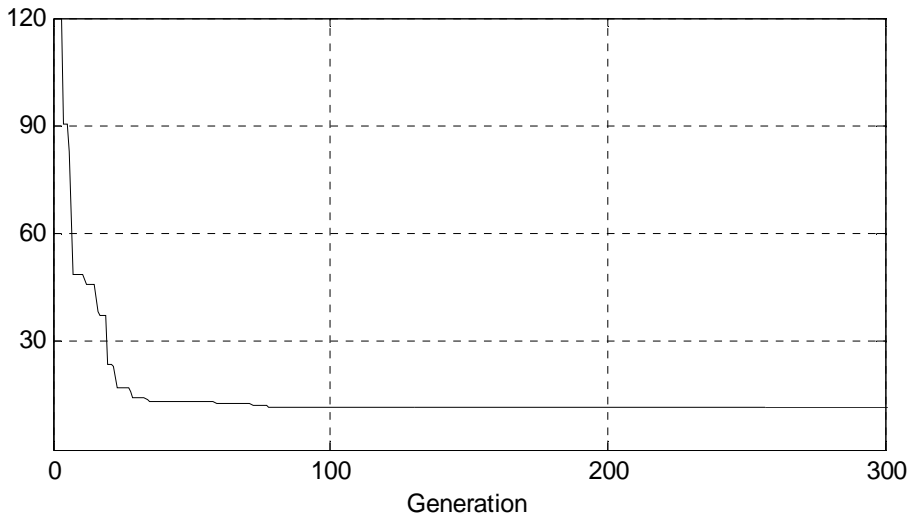
앞의 방법과 같이 1차 시간지연 모델로의 근사화에 RCGA가 사용되었고 파라미터들은 각각  $0 \leq K \leq 50$ ,  $0 \leq \tau \leq 50$ ,  $0 \leq L \leq 10$ 의 구간에서 탐색되었다. 이때 샘플링 시간은  $h = 0.01$ 초 이었다.  $K = 1.002$ ,  $\tau = 2.497$ ,  $L = 6.64$ 를 얻을 수 있었다. 시스템 II는  $\frac{L}{\tau} = 2.7$ 이고 시간지연이 시정수보다 큰 경우이다. (5.3)의 근사화한 모델은 (5.4)와 같다.

$$G_m(s) = \frac{1.002e^{-6.64s}}{1+2.497s} \quad (5.4)$$

그림 5.4는 RCGA가 모델의 파라미터들을 탐색해 가는 과정들을 나타낸 것이다.



(a) Parameters



(b) Objective function

그림5.4 모델 파라미터들의 진화적 탐색

Fig. 5.4 Evolutionary search of the model parameters

그림 5.5는 예제의 시스템과 근사화한 모델에 계단응답을 입력하여 추정된 모델을 검증한 것이다.

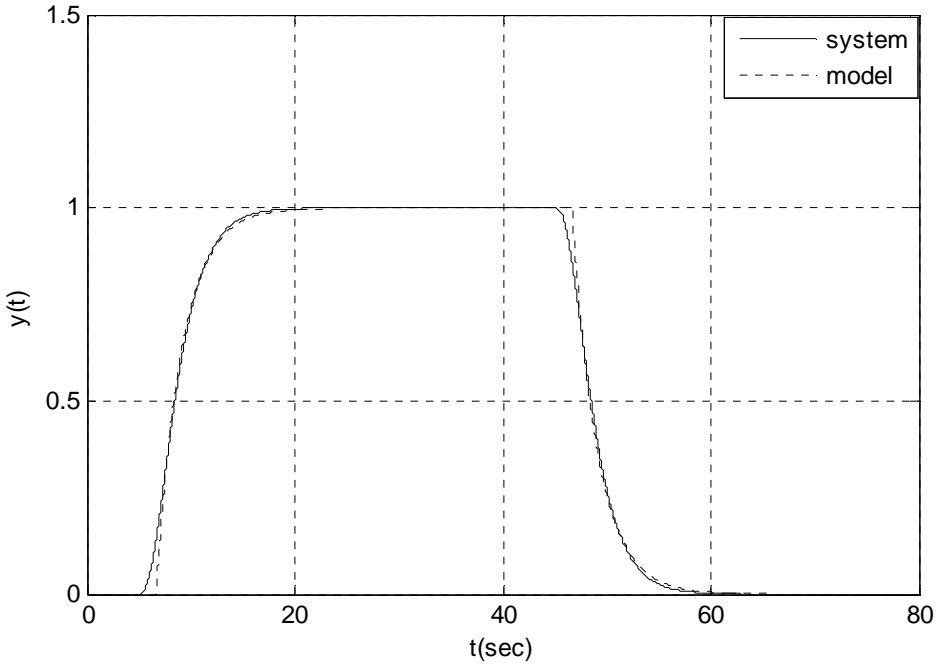


그림 5.5 추정된 모델의 검증

Fig. 5.5 Verification of the estimated model

### 5.2.2 PID 제어기의 응답비교

Z-N법의 제어기 계수는  $K_p = 0.537$ ,  $\tau_i = 13.280$ ,  $\tau_d = 0.1880$  이고 L-ITAE법은  $K_p = 0.420$ ,  $\tau_i = 6.103$ ,  $\tau_d = 2.517$ 이며 동일한 방법으로 응답실험을 실시하여 세 성능을 구한 것이 그림 5.6이다.

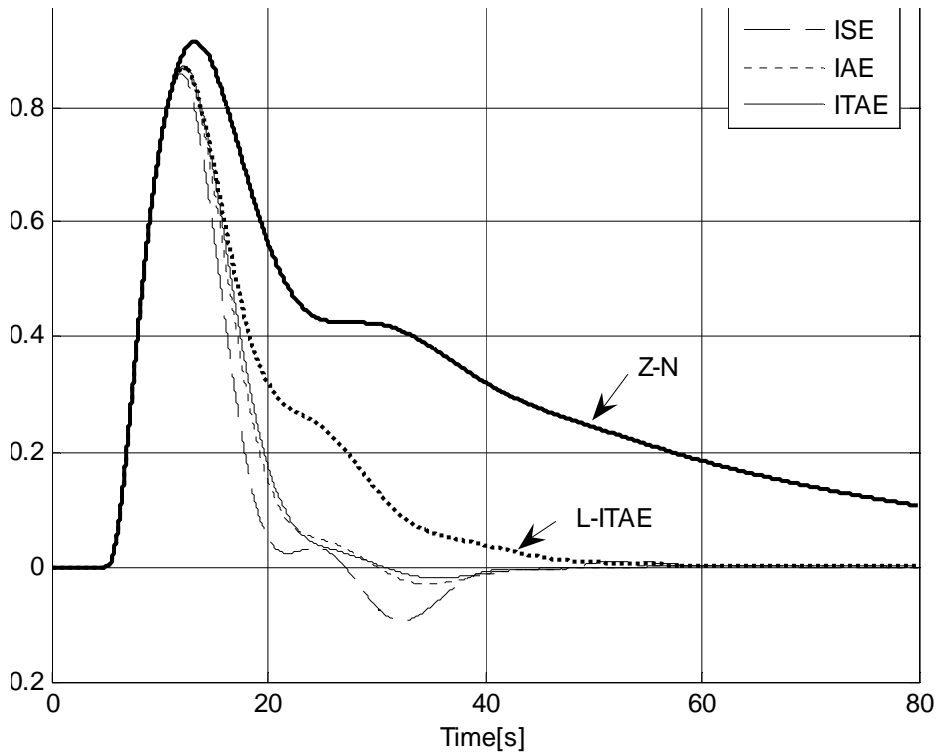


그림 5.6 시스템 II의 PID제어기의 응답 비교

Fig. 5.6 Response comparison of the PID controllers for System II

이 결과에서 얻은  $M_{pk}$ ,  $t_{pk}$ ,  $t_{ry}$  값은 다음 표 5.2에 나타내었다.

표 5.2 시스템 II에 대한 성능 비교

Table 5.2 Performance comparison for System II

Performance Tuning rule	$M_{pk}$	$t_{pk}$	$t_{ry}$
GA-ISE	0.86	11.98	38.52
GA-IAE	0.87	12.18	38.43
GA-ITAE	0.87	12.26	27.79
Z-N	0.87	12.22	138.11
L-ITAE	0.87	12.25	44.28

이 경우에도 제안한 방법들이 기존의 방법보다  $M_{pk}$ ,  $t_{pk}$ ,  $t_{ry}$  등에서 더 우수한 성능을 보임을 확연히 알 수 있다. Z-N법은  $M_{pk}$ 도 클 뿐 아니라 외란의 영향이 제거되는 회복시간  $t_{ry}$ 도 길다.

### 5.3 예 제3

5.1절과 5.2절에서는  $\frac{L}{\tau}$ 이 동조규칙을 얻는데 사용한 데이터 범위( $0 < \frac{L}{\tau} < 3$ ) 안에 있었다. 여기서는 그 범위 밖에서도 적용 가능한 지를 살펴보기로 한다. 다음과 같은 4차 시스템을 고려하였다.

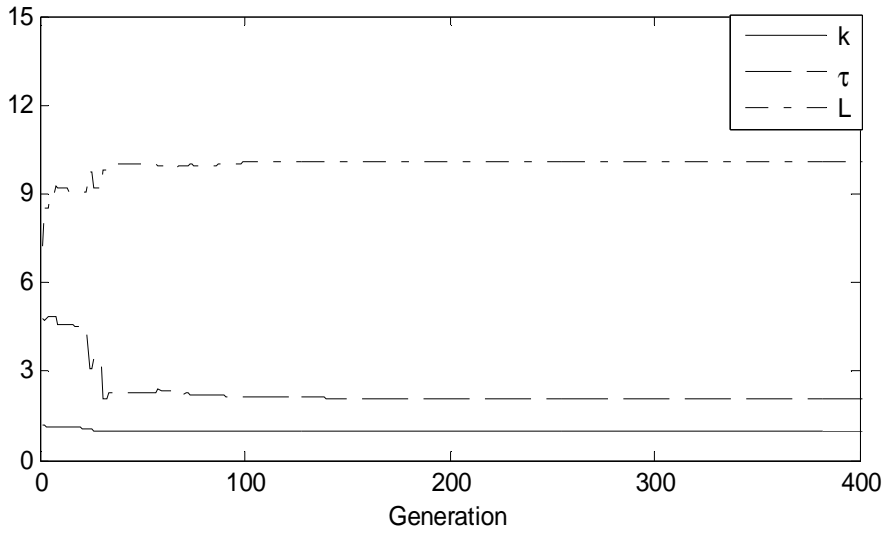
$$\text{시스템 III: } G_p(s) = \frac{e^{-8s}}{(1+s)^4} \quad (5.5)$$

### 5.3.1 시스템의 근사화

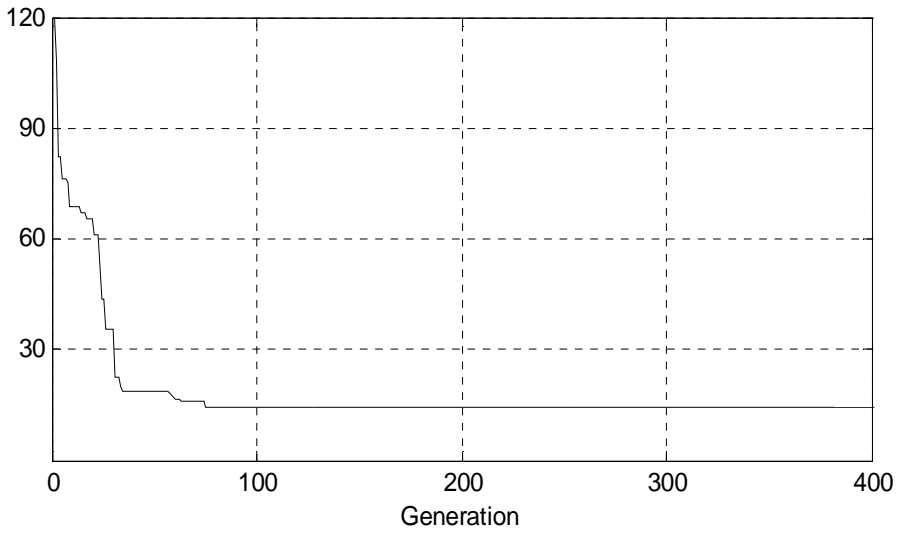
앞의 예제들과 마찬가지로 근사화하였고, 이 시스템의 경우  $K=1.001$ ,  $\tau=2.093$ ,  $L=10.08$  을 얻었고  $\frac{L}{\tau}=4.8$ 로서 3보다 큰 경우이다. (5.6)은 (5.5)를 1차 모델로 근사화한 것이다.

$$G_m(s) = \frac{1.001e^{-10.08s}}{1+2.093s} \quad (5.6)$$

그림 5.7은 RCGA가 모델의 파라미터들을 탐색해 가는 과정을 나타낸 것이다



(a) Parameters



(b) Objective function

그림 5.7 모델 파라미터의 진화적 탐색

Fig. 5.7 Evolutionary search of the model parameters



그림 5.8은 예제의 시스템과 근사화한 모델에 계단응답을 입력하여 추정된 모델을 검증한 것이다. 그림으로부터 모델은 시스템과 잘 일치함을 확인할 수 있다.

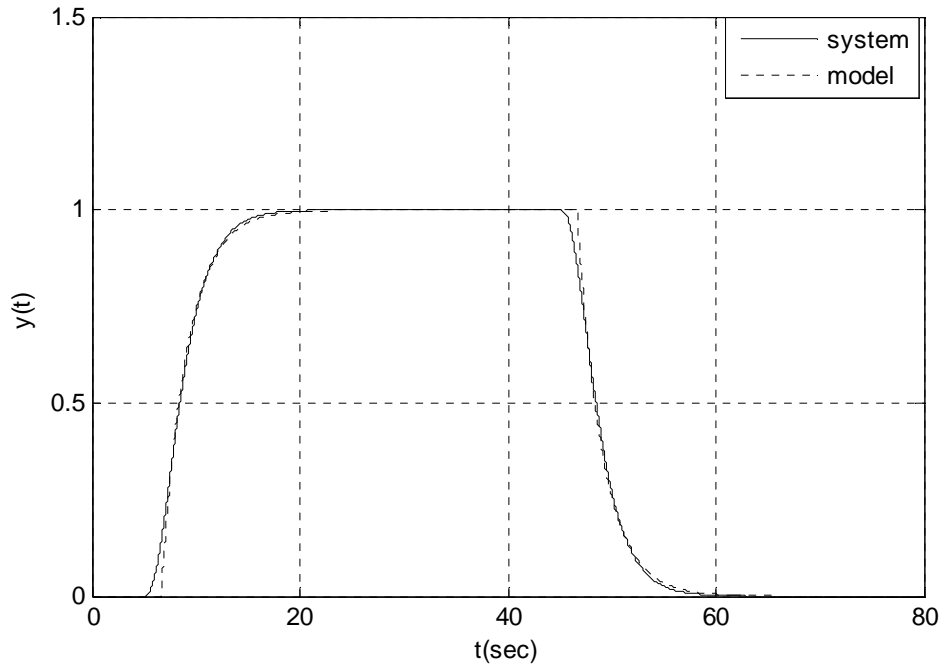


그림 5.8 추정된 모델의 검증

Fig. 5.8 Verification of the estimated model

### 5.3.2 PID 제어기의 응답비교

사용한 Z-N법의 제어기 계수는  $K_p = 0.249$ ,  $\tau_i = 20.160$ ,  $\tau_d = 5.040$  이고 L-ITAE법은  $K_p = 0.306$ ,  $\tau_i = 7.930$ ,  $\tau_d = 3.810$ 이며 100초간의 단위계단응답은 그림 5.9와 같다.

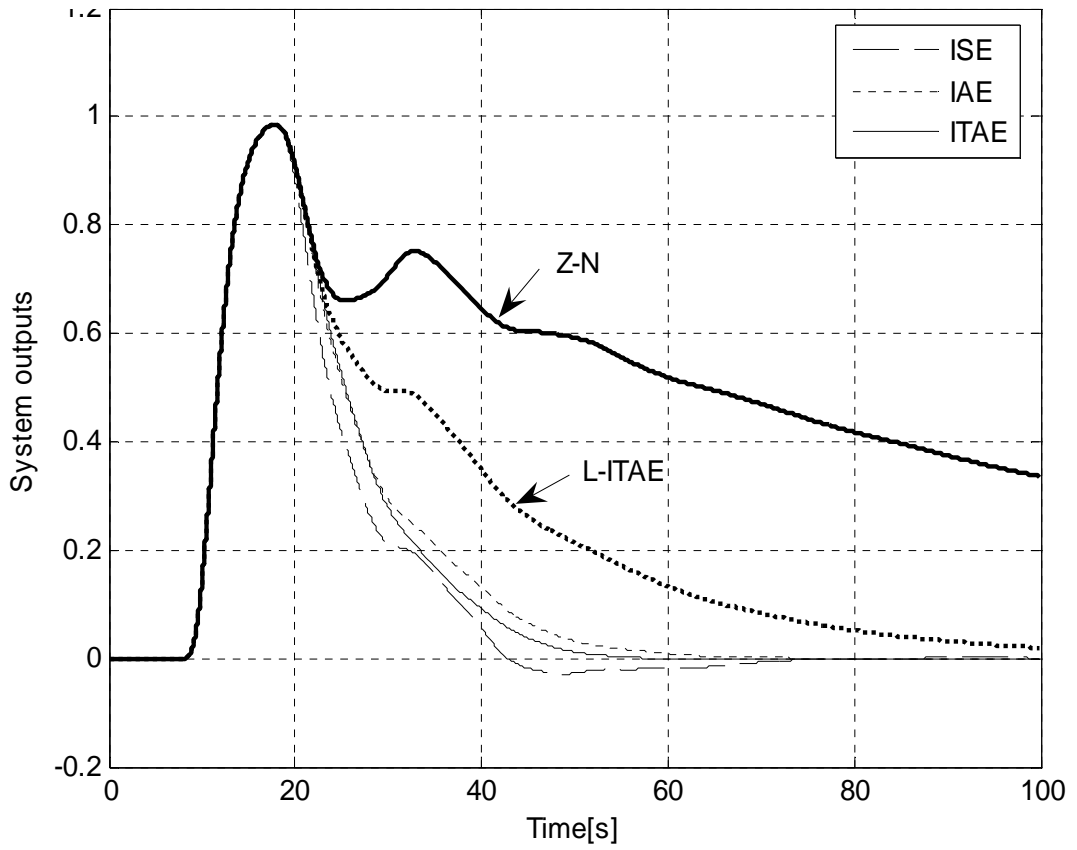


그림 5.9 시스템 III의 PID제어기의 응답 비교

Fig. 5.9 Response comparison of the PID controllers for System III

응답실험으로 인해 구하여진  $M_{pk}$ ,  $t_{pk}$ ,  $t_{ry}$  값은 다음 표 5.3과 같다.

표 5.3 시스템 III에 대한 성능 비교

Table 5.3 Performance comparison for System III

Performance Tuning rule	$M_{pk}$	$t_{pk}$	$t_{ry}$
GA-ISE	0.984	17.76	56.24
GA-IAE	0.985	17.88	54.32
GA-ITAE	0.986	17.91	48.09
Z-N	0.985	17.84	353.20
L-ITAE	0.985	17.86	100.14

$\frac{L}{\tau}$ 이 탐색범위 보다 더 큰 경우에도 역시 제안한 동조기법이 더 효과 있음을 알 수 있다. 특히 ITAE는 오차에 시간 가중치를 두었기 때문에 가장 만족스러운 성능을 확인 할 수 있다. 전체적으로 앞의 두 시스템과 유사한 경향을 보이지만,  $\frac{L}{\tau}$ 이 클수록 기존의 방법보다 더 양호한 응답특성을 보여줌을 확인할 수 있다. 특히 이 경우에 Z-N법은 회복시간이 길어 적용이 쉽지 않다.

## 제 6 장 결론

본 연구에서는 세 가지 성능지수(ISE, IAE, ITAE)에 대해 외란제거용 PID 제어기의 새로운 동조규칙을 얻는 문제를 다루었다. 먼저 시간지연을 갖는 1차 모델에 대해서 RCGA는 각 성능지수를 최소화 하도록 PID 계수들을 동조하고, 계산된 계수와 동조규칙 모델과 또 다른 RCGA를 이용하여 외란제거용 PID 제어기의 동조규칙을 유도하였다. 3가지 시스템에서 대한 시뮬레이션을 실시하여 제안한 동조규칙들의 성능이 우수함을 보여주며 기존의 두 동조규칙보다 더 나은 결과를 확인할 수 있었다. 외란제거용 공정제어는 실제 현장에서 종종 찾아볼 수 있으므로 제안한 동조 법은 유용한 방법이 될 것이다

차후 연구로는 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] 김동화, 이은용, "PID 제어기 튜닝 기술에 대한 연구현황과 전망", 전기학회지, 제44권, 제5호, pp. 13-23, 1995.
- [3] J. G. Ziegler and N. B. Nichols, "Optimum setting for PID controllers", Trans. ASME, Vol. 64, pp. 759-768, 1942.
- [4] B. Porter and A. H. Jones, "Genetic tuning of digital PID controllers", Electronic Letters, Vol. 28, No. 9, pp. 843-844, 1992.
- [5] Chia-Ju Wu, "Genetic Tuning of PID Controllers Using a Neural Network Model: A Seesaw Example", J. of Intelligent and Robotic Systems, Vol. 25, pp. 43-59, 1999.
- [6] 임재식, "PID제어기 자동동조에 관한 연구 및 온도제어에의 적용", 경상대학교 석사학위 논문, 2000.
- [7] 김도용, 진강규, "RCGA를 이용한 PID 제어기의 모델기반 동조규칙", 제어·자동화·시스템공학회 논문지, 제8권, 제12호, pp. 1056-1060, 2002.
- [8] A. M. Lopez, C. L. Miller and C. L. Murill, "Tuning controller with error-integral criteria", Instrumentation Technology, Vol.14(2), pp. 57-62, 1967.
- [9] 진강규, 주상래, "실수코딩 유전알고리즘에 관한 연구," 제어·자동화·시스템공학 논문지, 제6권, 제4호, pp. 268-275, 2000.
- [10] 진강규, 유전알고리즘과 그 응용, 교우사, 2000.
- [11] 강원룡, "실수코딩 유전알고리즘과 단체법을 결합한 하이브리드 탐색법", 한국해양대학교 석사학위 논문, 2002.

- [12] 이현식, 진강규, “유전알고리즘을 이용한 연속시스템의 온라인 파라미터 추정,” 제어·자동화·시스템공학 논문지, 제4권, 제1호, pp. 76-81, 1998.

# 감사의 글

어렵고 힘들었던 나날들, 이를 이겨내고 버틸 수 있는 힘을 주셨던 많은 분들과 작은 감사를 표시하려합니다.

본 논문이 완성되기까지 부족한 제자에게 배움의 길을 열어주시고 자상한 관심을 베풀어 주신 진강규 지도교수님께 진심으로 감사드립니다.

또한 바쁘신 와중에서도 심사과정에서 면밀한 검토와 지도로 논문의 깊이를 더해주시는 김종화, 유영호 교수님께 감사드립니다.

아울러 학부과정부터 많은 가르침을 주신 조석제, 하윤수, 황승욱 교수님과 그의 한국해양대 IT 공학부 모든 교수님들께 감사드립니다.

무사히 학창시절을 마칠 수 있도록 도와주신 모든 분들 감사합니다.

힘든 일이 있을 때마다 항상 따뜻한 조언과 많은 도움을 주시고 바른길을 제시 해주신 천행춘 교수님 저에게 매우 큰 힘이 되었습니다. 본 연구의 수행에 많은 도움을 주신 이운형 선배 그 동안의 많은 친절에 감사드립니다. 대학원 입학 후 대학원 생활에 좋은 나침반이 되어주셨던 현경언니, 함께 실험실 생활은 못했지만 여러모로 신경써주셨던 현식선배와 2년을 함께 있었던 정문오빠와 제 어기기 실험실을 거쳐 지나가셨던 많은 선배님들, 부족한 저에게 희망과 용기를 심어주신 모든 제어계측공학과 대학원 선배님들 감사드립니다. 또한 친절하고 온화한 미소로 저를 대해주었던 강군호 조교님, 김경언 조교님께도 감사드립니다.

나에게 행복을 선물해 주었던 해양대학교에서 내가 찾은 보물들에게도 감사를 표합니다.

항상 밝은 웃음으로 미소를 자아내게 하고 힘들고 피로울 때 항상 힘을 불어주며 아름다운 추억을 많이 만들었던 미, 은경, 주은, 타지생활 하는 나를 위해 또 다른 가족이 되어 끊임없이 위로와 격려를 아끼지 않은 수경언니, 눈물로 새벽을 함께 열었던 지은이, 맛난 음식과 온화한 미소로 몸과 마음 모두를 행복하게 해주었던 예희언니, 또 다른 내가 되어 나를 이해해주고 많은 힘이 되어준 소중한 친구 영미, 정신적 고통을 함께 나누었던 유진이, 날 즐겁게 해주었던 보라언니, 때론 찬구 같고 가끔은 오빠 같았던 후배 의현이, 선진이, 내

고민들을 함께 해주었던 이종명 중위님, 뽀뽀한 일정 속에서 함께 즐거움을 찾았던 미희, sos를 외치면 항상 발 벗고 도와주었던 학선, 홍석, 주환, 성우, 종화, 오빠, 지금은 중국에 돌아갔지만 항상 마음속에 남을 강향, 왕개, 축리, 해연이, 국적은 다르지만 아름다운 우정을 가르쳐주었던 베트남 친구들, 뒀안, 환, 흥, 논, 그리고 힘들고 지친 일상생활 속에서 삶의 활기를 불어주었던 해돋이 공부방 학생들, 수녀님들, 동료 선생님들 감사합니다.

이름을 모두 열거할 수는 없지만 저에게 도움을 주셨던 모든 분들을 잊지 않겠습니다.

마지막으로 오늘의 제가 있기까지 언제나 변치 않는 사랑으로 지켜봐주시며, 어려움 속에서도 저를 뒷바라지 해주신 부모님과 동생 나은에게 이 작은 결실을 바칩니다.