



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



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

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

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

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

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

RCGA를 이용한 TITO 시스템의 PID제어기 설계

Design of PID Controller for TITO system using RCGA



2012년 8월

한국해양대학교 대학원

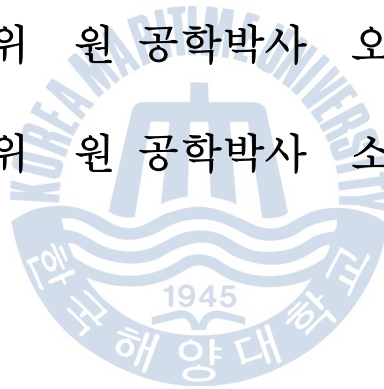
메카트로닉스공학과 권석경

本 論 文 을 權 錫 旻 의 工 學 碩 士 學 位 論 文 으 로 認 准 함.

위원장 공학박사 오 세 준 인

위 원 공학박사 오 진 석 인

위 원 공학박사 소 명 옥 인



2012년 6월 14일

한국해양대학교 대학원

메카트로닉스공학과

목 차

Abstract	iii
제 1 장 서론	1
1.1 연구 배경	1
1.2 연구 내용과 구성	2
제 2 장 최적 이득 탐색을 위한 GA이론	4
2.1 유전알고리즘의 특징	4
2.2 유전알고리즘의 기본 구조	4
2.2.1 해 파라미터(염색체)의 표현	6
2.2.2 초기 집단의 생성	7
2.2.3 적합도 평가	7
2.2.4 기본 유전연산자	8
2.2.5 전략	12
2.2.6 정지 조건	13
제 3 장 TITO 시스템의 PID제어기 설계	14
3.1 상호 간섭이 있는 다변수 시스템	14
3.1.1 다변수 시스템	14
3.1.2 TITO 시스템	16
3.2 Z-N에 의한 PID제어기 설계	17
3.2.1 Z-N의 동조규칙	17
3.2.2 Z-N에 의한 TITO 시스템의 PID제어기 설계	20
3.3 RCGA에 의한 PID제어기 설계	23

제 4 장 시뮬레이션	25
4.1 예제 시스템 I	25
4.1.1 Z-N의 동조규칙을 이용한 PID제어기	25
4.1.2 RCGA를 이용한 PID제어기	27
4.1.3 응답특성	32
4.2 예제 시스템 II	40
4.2.1 Z-N의 동조규칙을 이용한 PID제어기	40
4.2.2 RCGA를 이용한 PID제어기	45
4.2.3 응답특성	49
제 5 장 결론	57
참고문헌	58



Design of PID Controller for TITO system using RCGA

Seok-kyung, Kwon

*Department of Mechatronics, Graduate School
Korea Maritime University*

Abstract

The Proportional Integral Derivative(PID) controller are still widely used in the process industries even though control theory has developed significantly since they were first used several decades ago.

As our industry has developed and increased the level of high-technology, many suggestions have appeared to upgrade the PID controller. Most of them are mainly based on experiences and experimentations. As a result, tuning of PID controller depends on designer's experience and intuition. Closed loop tuning method of Ziegler and Nichols(Z-N), Open loop tuning method, Cohen-Coon(C-C) tuning method and IMC tuning method are well known to us.

There is much reserch on the tuning of PID controllers for SISO(Single Input Single Output) systems but very little in done of MIMO(Multi-Input Multi-Output) systems. Because it is more difficult to design PID controllers for a MIMO process than for a SISO process that there is an interaction between the different control loops in an MIMO system which affects each other's performance.

The paper presents model-based tuning rules of the PID controller for the Two-Input Two-Output(TITO) system of the most common

form of MIMO system incorporating with Genetic Algorithms(GA). The ranges of PID parameters are limited based on Z-N method to consider a long operation time problem that is the main problem of GA. And three sets of optimal PID parameters are obtained based on GA which minimizes performance indices(ISE, IAE and ITAE).

The proposed method can help solving the problem of tuning PID controller for TITO system. Simulation results showed the effectiveness of the proposed scheme.



Nomenclature

a_{ij}	i th row and j th column element of matrix \mathbf{A}
\mathbf{e}	error state vector
$f(\mathbf{s}(k))$	fitness function
$f_b(k)$	fitness of the best
$F(\mathbf{x}(k))$	objective function
k	k th generation
\hat{k}_i	gain of error compensator
N	population size
$P(k)$	population at k th generation
$\tilde{P}(k)$	population after crossover at k th generation
$\bar{P}(k)$	population after reproduction at k th generation
P_c	crossover rate
P_m	mutation rate
R	real number
r	random real number between 0 and 1
\mathbf{s}	string or chromosome
$\tilde{\mathbf{s}}$	string or chromosome after crossover
$\bar{\mathbf{s}}$	string or chromosome after reproduction
s_i	i th chromosome
T	maximum generation of RCGA
\mathbf{u}	control input
$x_j^{(L)}$	lower boundary of j th gene
$x_j^{(U)}$	upper boundary of j th gene
$x_{ij}(k)$	j th gene of i th chromosome
\tilde{x}_j	j th gene after mutation
\bar{x}_j^u, \bar{x}_j^v	gene of parent chromosome
$\tilde{x}_j^u, \tilde{x}_j^v$	gene of offspring chromosome
\mathbf{x}	state vector
$\mathbf{x}_b(k)$	chromosome of the best
\mathbf{x}_p	state vector of system

$\hat{\mathbf{x}}$	augmented state vector
\mathbf{y}	system output
\mathbf{y}_r	reference input
\mathbf{z}	error state variable
γ	constant
η_i	parameter of the reproduction operator
λ	multiplier
τ	random number of 0 or 1



제 1 장 서 론

1.1 연구 배경

PID제어기는 20세기에 접어든 1922년 Minorsky에 의해 처음 고안되어 1936년 미국 Taylor사의 Callender등에 의해 공기식 PID조절기의 원형이 만들어지고, Ziegler-Nichols(Z-N)에 의해 파라미터 동조법이 개발되면서 현재까지도 산업 현장에서 가장 많이 사용되고 있다.

많은 산업 현장 속의 실제 시스템들은 대부분 서로의 출력에 영향을 미치는 다변수 시스템(multi-variable system)이다. 뿐만 아니라 구조가 복잡하고, 외란이나 잡음에 큰 영향을 받기 때문에 이러한 시스템들을 대상으로 PID제어기를 설계하는 것은 매우 복잡하다.

한편, PID제어기의 파라미터는 제어기의 성능에 결정적인 영향을 미치기 때문에 같은 구조의 시스템이라도 파라미터 값에 따라 좋은 성능의 안정적인 제어 시스템이 되기도 하고, 제어 불가능한 시스템이 되기도 한다. 이와 같은 이유로 실제 현장에서는 PID제어기를 동조하는 데 많은 비용과 인력 그리고 시간을 투자한다.

기존에 많이 알려진 PID제어기의 동조법은 대부분 경험적이고 실험적으로 접근하므로 설계자의 경험과 직관이 제어기 동조에 큰 영향을 미친다. 가장 대표적인 방법으로는 Z-N의 페루프 동조법, 개루프 동조법과 Cohen-Coon(C-C) 동조법, IMC 동조법 등이 있으며, 현대에는 유전알고리즘(Genetic Algorithm, GA) 등과 같은 최적화 기법을 이용하여 주어진 조건에서 PID제어기 파라미터를 최적으로 동조하는 연구도 진행되고 있다.

본 논문에서는 다변수 시스템 중 TITO(Two-Input, Two-Output: 2-입력, 2-출력)시스템의 PID제어기의 동조방법에 대하여 연구하였다. TITO 시스템의 PID제어기 설계방법은 Niederlinski[1]에 의해 일반화된 Z-N방법으로 제시하였다. 다른 방법으로 Skogestad[2], Chiu[3], Hovd[4], Gagnon[5] 등이 H^∞ 및 μ -Synthesis 이론을 이용하여 강인한 성능을 이룰 수 있는 분산된 제어기 동조 방법을 제시하였고, Lee-Suh[6]는 시스템의 상태방정식을 상태변수의 개수와 출력의 개수가 같도록 하는 극심한 제한조건을 극복하기 위한 TITO 시스

템의 분산된 LQ-PID제어기 동조를 제시하였다.

본 논문에서는 최적화 기법 중의 하나인 실수코딩 유전알고리즘(Real-Coded Genetic Algorithm, RCGA)을 이용하여 TITO 시스템의 PID제어기 파라미터를 최적으로 탐색하는 일련의 과정을 제안하였다.

1.2 연구 내용과 구성

다변수 시스템은 산업 현장에서 두 개 이상의 변수를 제어해야 하는 경우로 이들 대부분은 상호간의 출력에 서로 간섭을 일으킨다. 대표적인 예로 공정제어(process control)에서 압력과 유량을 동시에 제어하는 경우를 생각할 수 있다. 압력 조정용 조절 밸브를 조작하여 압력을 제어하면 의도와는 관계없이 파이프 내로 흐르는 유량도 변하게 되고, 반대로 유량 조정용 조절 밸브를 조작하여 유량을 제어하면 파이프 내의 유량이 변하므로 압력도 동시에 변하게 된다. 또 다른 예로 증류탑의 온도 제어를 생각해 볼 수 있다. 증류탑의 탑정 온도를 상승시키기 위하여 리보일러의 증기량을 증가시키면 탑저의 온도 또한 상승하게 되어 어느 한쪽만 단독으로 변화시킬 수 없게 된다.

이처럼 제어대상의 상호 간섭을 일으키는 경우를 산업 현장에서 쉽게 찾아볼 수 있으며 본 논문에서는 제어대상이 상호 간섭하는 시스템 중에서 TITO 시스템의 PID제어기 설계 문제에 대해 고려하기로 한다. 이처럼 TITO 시스템은 단일입력단출력(Single-Input Single-Output, SISO)시스템보다 시스템 자체가 복잡하기 때문에 PID제어기 설계도 까다롭다.

따라서 본 논문에서는 최적화 알고리즘의 하나인 RCGA를 이용하여 TITO 시스템의 PID제어기 파라미터를 최적으로 탐색하는 방법을 제안한다. 이 때 RCGA는 파라미터 탐색범위가 크면 클수록 지역해(local solution)에 빠지지 않고 전역해(global solution)에 도달할 수 있는 확률이 커지지만 연산시간이 길어지게 된다. 대신 탐색범위의 기준이 주어지면 전역해를 보장하면서 연산 시간을 절약할 수 있게 된다. 본 논문에서는 Z-N의 PID 동조규칙을 이용하여 탐색범위의 기준으로 사용하기로 한다. 이를 위해 우선 TITO 시스템을 2개의 SISO 시스템으로 분리(decouple)하고, Z-N가 SISO시스템에 제안한 동조규칙을 적용하여 TITO 시스템의 PID제어기 파라미터를 구한다. 이렇게 구한 파라미터를 참조하여 RCGA의 PID제어기 파라미터 탐색범위를 결정한다. 이를 통해 RCGA

의 탐색범위를 줄여 연산시간을 줄이고, 전역해를 보장할 수 있게 한다.

이와 같은 내용으로 본 논문은 5장으로 구성된다. 제1장은 서론이고, 제2장은 본 논문에서 PID제어기 동조법으로 사용한 RCGA의 개요에 대해 설명한다. 제3장에서는 TITO 시스템에 대한 개념 및 사례를 설명하고, Z-N의 동조 방법과 이를 바탕으로 RCGA에 의한 PID제어기 설계 방법을 설명한다. 제4장에서는 TITO 시스템의 두 가지 모델을 선정하여 제3장에서 설명한 이론을 적용하여 시뮬레이션을 실시하고, 제안한 제어기법의 유효성을 검증한다. 마지막으로 제5장에서는 본 논문의 최종적인 결론을 도출한다.



제 2 장 최적 이득 탐색을 위한 GA이론

2.1 유전알고리즘의 특징

유전알고리즘(genetic algorithm)은 Holland[7]에 의해 1975년 처음으로 개발된 유전학과 자연환경에서 발견되는 자연선택(natural selection) 원리를 알고리즘 형태로 구현하여 컴퓨터 알고리즘으로 모방한 최적화 기법이다[8,9]. 유전알고리즘은 두 부모 유전자로부터 그들 자손의 유전자를 형성하는 유성생식과 자연환경에서 일어나는 진화원리를 모방하며 이를 위해 해가 될 가능성이 있는 집단에서 서로 간의 유전정보를 교환하여 재생산(reproduction), 교배(crossover), 돌연변이(mutation)와 같은 자연의 진화과정과 유사한 유전 연산자가 작동하여 “적자생존(survival of the fittest)”의 개념을 적용시킨다.

기존의 탐색 알고리즘과 유전알고리즘의 차이는 유전 연산자라는 독특한 연산 방법을 사용하여 파라미터를 직접 적용하기 보다는 이를 적절히 기호로 표현하여 이용하며 하나의 해를 다루기보다 집단을 취급한다는 점이다. 또한 이득 함수 또는 목적함수 값만을 필요로 하고, 연속성, 미분가능성, 다봉성과 같은 다양한 형태의 탐색공간으로부터 자유롭고, 목적함수 외의 탐색공간에 대한 사전 지식을 요구하지 않으며, 매우 크고 복잡한 공간일지라도 전역해 쪽으로 수렴시키는 것이 가능하다. 또한 기존의 탐색 기법이 갖는 “결정적”이라는 특징보다 “확률적”이라는 특성을 가지며, 보다 더 강인한 탐색이 가능한 장점 때문에 많은 분야에서 성공적으로 응용되고 있다.

2.2 유전알고리즘의 기본 구조

유전알고리즘은 주어진 문제의 해가 될 가능성이 있는 개체들로 구성되는 초기집단이 생성되면 목적함수를 기반으로 각 개체의 적합도가 평가되고, 일련의 재생산, 교배, 돌연변이 연산을 통해 집단이 변경되며, 다시 개체의 적합도가 평가되는 연산을 반복함으로써 집단 내 개체들을 최적해 쪽으로 진화해가도록 한다.

Fig. 2.1은 유전알고리즘의 대략적인 구조를 나타낸다.

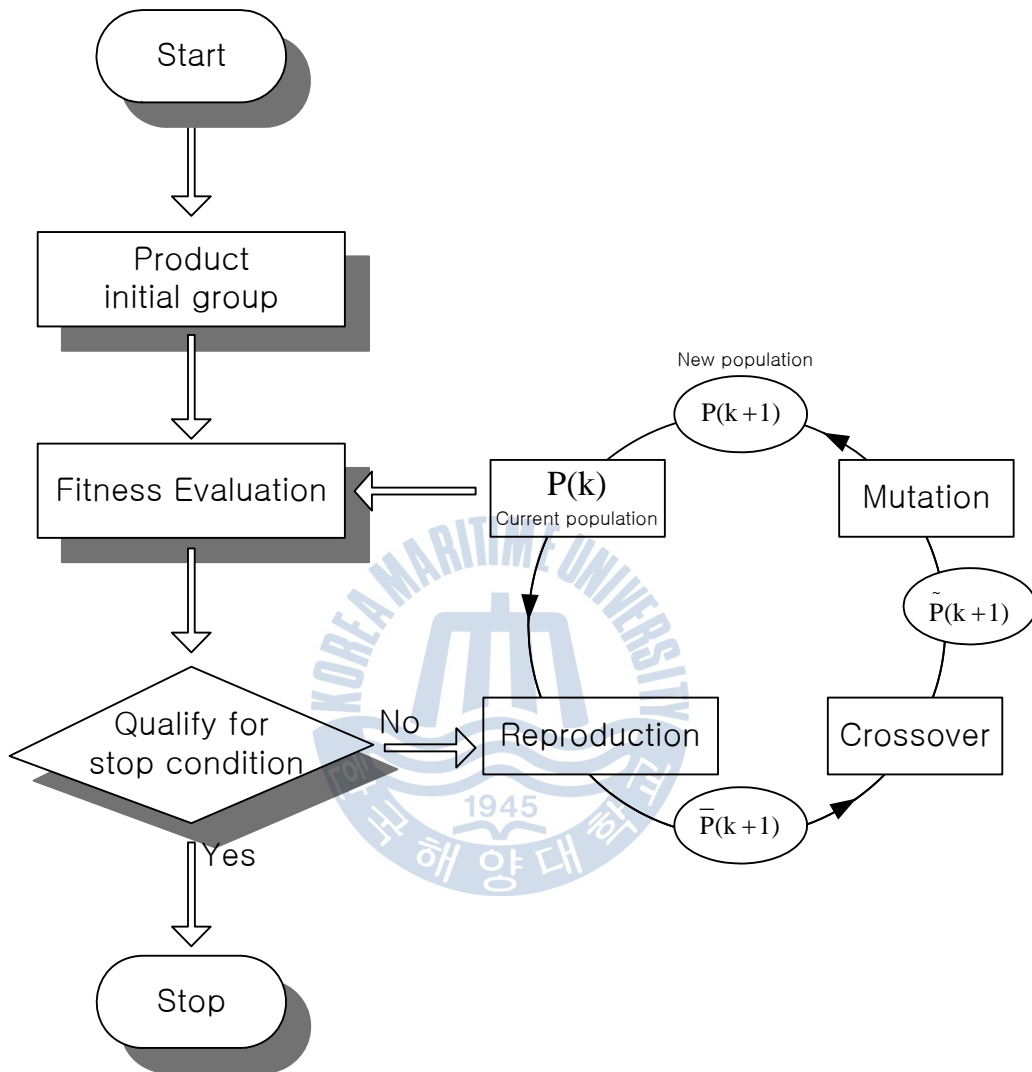


Fig. 2.1 Operation of a genetic algorithm

2.2.1 해 파라미터(염색체)의 표현

유전알고리즘은 기존의 탐색 알고리즘과는 달리 파라미터 그 자체를 다루기보다는 연산에 적합한 부호공간 상의 자연 파라미터(natural parameter)의 형태로 변환하여 사용하여 왔고, 주로 이진 염색체를 다루는 이진코딩 유전알고리즘(Binary-Coded Genetic Algorithm: BCGA)으로 표현해왔다. 이 방법은 이론적 분석을 편리하게 하고 비트당 최대의 스키마(schema) 수를 제공하나, 탐색공간이 크거나 고정밀도의 해가 필요한 경우 또는 제약조건이 존재할 경우에는 염색체의 길이를 크게 해야 한다. 이는 연산 부담으로 나타나며 때로는 인접한 두 수 사이에 급격한 비트 차이를 발생시키는 해밍절벽(hamming cliff)이 일어나 비전역 최적해 쪽으로 수렴하는 문제를 야기한다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 본 논문에서는 기존 이진코딩의 단점을 극복하고 제약조건이 있는 경우에도 적절한 응용이 가능한 실수코딩 유전알고리즘(Real Coded Genetic Algorithm: RCGA)을 사용한다. RCGA는 염색체를 실수로 표시하기 때문에 염색체의 실수 유전자(gene)가 문제의 해 벡터와 일대일로 대응하게 되며 염색체의 길이 l 은 벡터 차원 n 과 일치하게 된다. 실수코딩 염색체는 식 (2.1)과 같은 형태로 표시된다.

▪ 실수코딩 염색체

$$\mathbf{s} = (x_1 \ x_2 \ \dots \ x_i \ \dots \ x_n) \quad (2.1)$$

여기서 $x_i \in \mathbb{R}$ 는 i 번째 유전자(요소), n 은 벡터의 차원이다. 실수코딩은 변수(표현형)와 유전자(유전자형)간에 일대일 일치로 프로그래밍이 간편해지고 BCGA에서 요구되는 부호화, 복호화 프로세스가 필요 없게 되어 탐색속도를 높일 수 있다. 또한, BCGA에서는 해밍절벽 때문에 어려운 지역동조를 RCGA에서는 더 적합하고 빠른 동조가 일어나도록 하는 불균등돌연변이 같은 연산자가 있어 지역동조를 통해 해의 정밀도를 개선할 수 있다. 해에 관한 사전지식이 없는 경우에는 매우 큰 정의영역을 정하는 것도 가능하다. 실수코딩을 채용함으로써 염색체의 길이는 벡터의 차원 N 과 일치하게 되고, 문제공간에서 가까운 두 점은 표현공간에서도 서로 가깝게 되는 특징을 갖는다.[10]

2.2.2 초기 집단의 생성

RCGA는 염색체로 이루어진 집단(population) 안에서 모의진화를 수행하고, 세대를 거치면서 좋은 유전자를 보유하게 된다. N개의 염색체(개체)로 구성되는 k세대의 집단 $P(k)$ 은 식 (2.2)과 같이 표시된다.

$$P(k) = \{s_1(k) \ s_2(k) \ \cdots \ s_i(k) \ \cdots \ s_N(k)\} \quad (2.2)$$

여기서 $s_i(k) = (x_{i1}(k) \ x_{i2}(k) \ \cdots \ x_{ij}(k) \ \cdots \ x_{in}(k))$ 는 i번째 염색체, $x_{ij}(k)$ 는 i번째 염색체의 j번째 원소, N은 집단의 크기(population size)이다. 집단 크기 N은 세대와는 관계없이 항상 일정한 크기를 갖는 것으로 가정한다.

$P(k)$ 는 염색체로 특징 지워지는 N개의 개체들의 집합으로 정의된다. 특히 초기 집단 $P(0)$ 는 알고리즘의 사용 목적에 따라 무작위로 생성되는 무작위 초기화법과 사전지식이나 경험을 기반으로 생성되는 유도된 초기화법이 있다. 전자는 난수발생기를 통하여 발생된 실수로 초기집단을 구성하고, 후자는 다른 간단한 탐색 알고리즘으로 해를 포함하는 근사적인 정의영역을 얻고, 이 안에서 균등 확률로 점들을 선택해서 초기화시킨다.

본 논문에서는 RCGA가 가혹한 환경에서부터 출발하여 해를 찾는 능력을 확인하기 위해 무작위법으로 초기집단을 초기화한다. 따라서 염색체 요소들은 난수발생기를 통하여 발생하는 정의영역 $x_j^L \leq x_{ij}(k) \leq x_j^U (1 \leq i \leq N, 1 \leq j \leq n)$ 내의 임의의 실수값으로 설정된다.

2.2.3 적합도 평가

자연계에서 한 생물의 생존 능력은 그 환경에 대한 적합도를 반영하게 되는 것과 마찬가지로 유전알고리즘은 최적해로의 수렴 정도를 개체의 적합도 평가(fitness evaluation)로 반영시킨다. 재생산, 교배, 돌연변이 연산을 통해 새로운 집단이 형성될 때마다 개체의 적합도는 목적함수에 의해 평가되고 적합도의 크기에 따라 다음 세대에서 선택되어 재생산되는 비율이 결정되게 된다. 이 과정에서 적합도가 큰 개체가 더 많은 보상을 받을 수 있도록 배려하기 위해서 적

합도 함수는 최대화 문제 형태로 표현되어야 하고, 음의 값을 갖지 않아야 한다. 따라서 최대화 혹은 최소화 문제로 기술되는 목적함수로부터 적절한 적합도 함수는 다음과 같은 사상(mapping)을 통해 얻을 수 있다.

- 최대화 문제 :

$$f(\mathbf{s}(k)) = F(\mathbf{x}(k)) - \gamma \quad (2.3a)$$

- 최소화 문제 :

$$f(\mathbf{s}(k)) = -F(\mathbf{x}(k)) - \gamma \quad (2.3b)$$

여기서 $f(\mathbf{s}(k))$ 는 적합도 함수, $F(\mathbf{x}(k))$ 는 목적함수, $\mathbf{x}(k)$ 는 n 차원 벡터, k 는 세대, γ 는 항상 $f(\mathbf{s}) \geq 0$ 을 만족시키는 상수로서 유전알고리즘의 성능에 직접적인 영향을 주므로 적절한 선정이 필요하다[11].

γ 는 부적절하게 선정되면 탐색 효율을 저하시킬 수 있는 요소로, 일반적으로 탐색 공간 내에서 목적함수의 최소치를 아는 것이 쉽지 않기 때문에 그 값을 경험적으로 아주 작은 값으로 선정된다.

2.2.4 기본 유전연산자

집단 내에서 모의진화를 일으키기 위해서는 자연의 진화원리를 알고리즘으로 흉내 내어야 하며, 이를 위해 대부분의 유전알고리즘에서 재생산, 교배, 돌연변이와 같은 유전 연산자(genetic operator)를 사용한다.

- 재생산

재생산(reproduction)은 자연의 적자생존 또는 자연도태를 인위적으로 모방한 메커니즘으로 각 개체의 적합도를 기반으로 집단 내의 개체들을 선택하고, 새로운 집단을 형성하는 과정이다. 이를 통해 집단 내의 약한 개체들은 도태되고, 강한 개체가 선택되어 세대교체가 진행될수록 좋은 유전자를 가진 집단이 되게 한다. 본 논문에서 구배와 유사한 재생산(gradient-like reproduction) [12]을 사용하였다. 이는 기존에 많이 알려진 룰렛휠 재생산 방법이 초기 세대에서 초우량 개체가 출현하면 이를 여러 번 복제하여 집단의 유전적 다양성을 감소시키고 확률적으로 최적 개체를 반드시 선택 못하는 단점을 극복한 방

법이다. 구배와 유사한 재생산 방법은 다음 6단계의 순서로 진행된다.

단계 1 집단 $P(k)$ 내 개체들의 적합도 $f_i(k)$ ($1 \leq i \leq N$)를 계산하고, 최적의 개체를 찾는다.

$$\begin{aligned} x_b(k) &= \arg \max_{1 \leq i \leq N} [f_i(k)] \\ &= [x_{b1}(k) \ x_{b2}(k) \ \cdots \ x_{bn}(k)]^T \end{aligned} \quad (2.4a)$$

$$f_b(k) = \max_{1 \leq i \leq N} [f_i(k)] \quad (>0) \quad (2.4b)$$

단계 2 $i = 1$

단계 3 $i \leq N$ 의 조건이 만족될 때까지 단계 3-6을 반복한다.

단계 4 다음 식으로 각 개체에게 새로운 값을 할당한다.

$$x_{ij}(k+1) = x_{ij}(k) + \eta_i \frac{[f_b(k) - f_i(k)]}{f_b(k)} [x_{bj}(k) - x_{ij}(k)] \quad (1 \leq i \leq N, j \leq n) \quad (2.5)$$

여기서 $x_{ij}(k+1)$ 은 재생산 후 i 번째 염색체의 j 번째 요소이고 $x_{ij}(k)$ 와 $x_{bj}(k)$ 는 $x_i(k)$ 와 $x_b(k)$ 의 j 번째 요소이며, 재생산 계수 η_i 는 평균이 η 이고 분산이 σ^2 인 정규분포 (η, σ^2)를 따르도록 선정되는 양의 상수이다.

단계 5 재생산된 염색체 $s_i(k+1) = (x_{i1}(k+1) \ x_{i2}(k+1) \ \cdots \ x_{in}(k+1))$ 를 새로운 교배급원인 $\bar{P}(k+1)$ 에 복사한다.

단계 6 $i = i+1$

▪ 교배

교배(crossover)는 자연계 생물의 유성생식을 모방하여 알고리즘 형태로 나타낸 것으로서 탐색공간상의 새로운 점을 찾기 위해 교배급원으로부터 부모 세대의 염색체 유전인자를 임의로 선택하고, 교배점 이후의 유전자들을 서로 교환, 결합하여 자손을 생성한다. 이러한 연산은 생성된 자손의 수가 부모 세대 집단의 크기와 같을 때까지 반복한다.

교배 연산자는 여러 가지가 있으나, 본 논문에서는 수정단순 교배(modified simple crossover)[11]를 사용한다. 이 방법은 무작위로 교배점 $j \in [1, N-1]$ 이 선택되면, 이 선택된 교배점 이후의 유전자를 서로 교환하여 자손을 형성하는 단순 교배와 교배점의 유전자를 일차결합(linear combination)하여 식 (2.6)과 같이 자손을 생성하는 산술적 교배를 결합한 형태이다.

$$\tilde{x}_j^u = \lambda x_j^v + (1 - \lambda) \bar{x}_j^u \quad (2.6a)$$

$$\tilde{x}_j^v = \lambda x_j^u + (1 - \lambda) \bar{x}_j^v \quad (1 \leq j \leq n) \quad (2.6b)$$

여기서 \bar{x}_j^u 와 \bar{x}_j^v 는 집단에서 선택된 부모 염색체의 유전자이고, \tilde{x}_j^u 와 \tilde{x}_j^v 는 자손 염색체의 유전자이다. λ 는 곱인수(multiplier)로서 고정되거나 각 유전자마다 독립적으로 결정될 수 있는 0과 1사이의 난수이다.

Fig. 2.2는 이 연산자의 연산 결과를 보여준다.

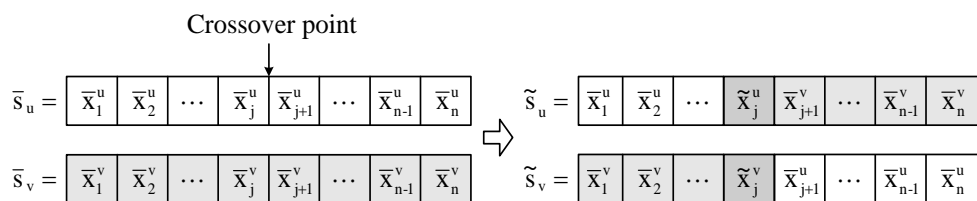


Fig. 2.2 Modified simple crossover

▪ 돌연변이

모의진화가 진행되는 동안 재생산과 교배를 통해 집단은 더욱 해에 근접한 염색체로 되고, 이는 염색체들이 서로 닮아가게 되는 요인이 된다. 돌연변이 (mutation)는 이러한 현상이 진화 초기에 발생하여 유전자의 다양성 결핍으로 인해 지역해(local solution)나 사점(dead corner)에 빠지는 것을 막기 위한 전략이다. 돌연변이가 연산 방법에는 여러 가지가 있으나 본 논문에서는 동적 돌연변이를 사용한다. 이 돌연변이 연산자는 정밀도를 높이기 위해 사용자가 불균형 정도를 결정할 수 있게 하여 미세 조정이 가능하다. 때문에 세대 초기에 전 탐색공간을 균등한 확률로 탐색하다가 세대수가 증가하면서 탐색영역을 좁혀 지역적으로 탐색한다. Fig. 2.3과 같이 j번째 유전자에서 돌연변이가 일어나면 x_j 는 식 (2.7)로부터 결정되어진다.

$$\tilde{s} = [\tilde{x}_1 \quad \tilde{x}_2 \quad \dots \quad \tilde{x}_j \quad \tilde{x}_{j+1} \quad \dots \quad \tilde{x}_{n-1} \quad \tilde{x}_n] \Rightarrow s = [x_1 \quad x_2 \quad \dots \quad x_j \quad x_{j+1} \quad \dots \quad x_{n-1} \quad x_n]$$

Fig. 2.3 Dynamic mutation

$$x_j = \begin{cases} \tilde{x}_j + \Delta(k, \tilde{x}_j^{(U)} - \tilde{x}_j), & \text{if } \tau = 0 \\ \tilde{x}_j - \Delta(k, \tilde{x}_j - \tilde{x}_j^{(L)}), & \text{if } \tau = 1 \end{cases} \quad (2.7)$$

여기서 \tilde{x}_j 는 교배 연산을 거친 염색체 내에서 돌연변이 확률에 의해 선택된 j번째 유전자이다. $\tilde{x}_j^{(L)}$, $\tilde{x}_j^{(U)}$ 는 각각 j번째 유전자의 하한값과 상한값이고, τ 는 0 또는 1을 취하는 난수이다. 이때 $\Delta(k, y)$ 는 다음의 함수가 사용된다.

$$\Delta(k, y) = y \cdot r \cdot (1 - \frac{k}{T})^b \quad (2.8)$$

여기서 r 은 0과 1사이의 실수 난수이고, T 는 유전알고리즘의 최대 세대수이며, b 는 불균형 정도를 나타내는 매개변수로서 사용자에게 의해 결정된다.

2.2.5 전략

적합도 평가를 위해 선정하는 γ 는 초기에 잘 선정해도 진화 도중에 값이 고정되면 선택압(selection pressure)이 떨어지는 문제가 발생한다. 한편, 교배와 돌연변이 연산을 거치면서 그 세대에서 확보된 최적 개체가 파괴될 수도 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 적합도의 스케일링(scaling)과 엘리트 전략(elitist strategy)을 사용한다.

■ 적합도의 스케일링

유전알고리즘이 특히 작은 집단을 취급할 때 개체집단의 적합도 평가는 그 성능에 크게 영향을 미친다. 만약 초기 세대의 집단에 초우량 개체가 출현하게 되면 재생산 연산자는 우량 개체를 여러 번 복제하게 되고, 그 결과 이들이 집단을 지배하게 되어 유전적인 다양성이 상실된다. 이와 반대로 후기 세대에는 집단이 강해지고 개체들이 한 점 주위로 군집되어 선택 결과가 무작위 탐색에 의한 결과와 유사해진다. 그러므로 초기에는 유전자의 다양성을 충분히 유지할 수 있도록 개체간의 상대적인 적합도의 영향을 줄여주고, 후기에는 그 영향이 커지게 해서 선택압을 일정하게 유지시켜 줄 필요가 있다.

이 같은 역할을 하기 위해 스케일링을 통한 정규화 방법과 스케일링 윈도우 기법을 통한 정규화 방법이 사용될 수 있다. 전자의 방법으로는 선형 스케일링(linear scaling), 시그마 절단(sigma truncation), 로그 스케일링(logarithmic scaling) 등이 있다. 후자의 방법은 과거 집단의 개수인 스케일링 윈도우 W_s 를 사용하여 선택압을 유지하는 것으로써 γ 값을 과거의 다수 집단에서 발견되는 목적함수 값으로 계속 변경해 주는 방법이다. 본 논문에서는 $W_s=1$ 로 선정한 스케일링 윈도우 기법을 사용한다.

■ 엘리트 전략

RCGA에서 채용하는 구배와 유사한 재생산은 최적개체의 생존을 보장해 주지만 교배와 돌연변이 연산을 거치는 동안 파괴될 수도 있다. 엘리트 전략(elitist strategy)은 한 세대의 최적 개체의 소멸을 방지하는 전략으로 이전 세대의 최적 개체를 저장하고 있다가 일련의 모의진화를 수행한 후 최적 개체가 소멸된 것이 확인 되면 현 세대의 가장 약한 개체 또는 임의로 선택된 개체를

저장된 최적 개체와 교환함으로써 집단 내에서 가장 강한 개체가 다음 세대로 전달되는 것을 보장한다. 이 방법은 일반적으로 유전알고리즘의 성능을 개선하는 것으로 알려져 있다[13].

2.2.6 정지 조건

유전알고리즘이 확률적인 탐색법이라는 사실을 생각할 때, 어느 시점이 전역 해에 도달한 것인지 알기가 쉽지 않다. 그러나 구체적인 적용에 있어서는 유전알고리즘을 정해진 세대까지 모의진화 시키는 방법을 사용한다. 만약 최종 세대까지 진화한 염색체가 만족할 만한 해에 근접하지 못하면, 최종 세대수를 증가시켜 다시 모의진화를 진행시킨다. 또 다른 방법으로 목적함수 값의 허용치를 정하고, 세대에 관계없이 목적함수가 허용치 안에 들어오면 모의진화를 종료시키는 방법도 있다. 본 논문에서는 전자의 종료 조건을 사용한다.



제 3 장 TITO 시스템의 PID제어기 설계

3.1 상호 간섭이 있는 다변수 시스템

3.1.1 다변수 시스템

산업 현장에서 볼 수 있는 제어시스템은 종종 두 개 이상의 변수를 제어해야 하는 경우가 많고, 상호간의 출력에 서로 간섭을 일으키는 경우가 있다.

Fig. 3.1에 나타난 것처럼 압력(P)과 유량(F)을 동시에 제어할 경우, 압력 조절 밸브 V_p 를 조작하여 압력을 제어하면 의도와는 관계없이 파이프 내로 흐르는 유량도 동시에 변하게 된다. 또한, 유량 조절 밸브 V_f 를 조작하여 유량을 제어하면 파이프 내의 유량이 변하므로 압력도 변하게 된다.

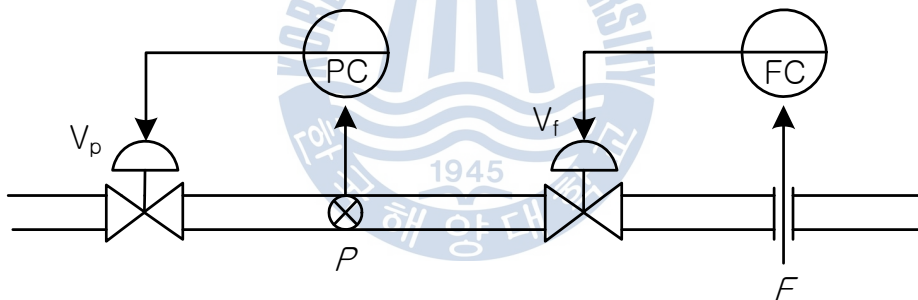


Fig. 3.1 Flow & pressure control system

즉, 유량은 목표값과 같고 압력만이 목표값에서 벗어나 있을 때 압력을 조절하기 위해 V_p 를 조작하면 지금까지 올바른 값이었던 유량까지도 변해버린다. 반대로 유량을 조절하기 위해서 조절 밸브 V_f 를 조작하면 압력도 변하게 된다. 이처럼 Fig. 3.1과 같은 시스템은 상호간의 출력에 영향을 준다는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 3.2는 증류탑의 온도 제어를 나타낸 것이다. 탑정의 온도 T_1 과 탑저의 온도 T_2 의 어느 한쪽만 단독으로 변화시킬 수는 없다. 즉, T_1 의 온도를 상승시키기 위해 리보일러의 조절밸브를 조작하여 증기량을 증가시키면 T_2 의 온도 또

한 상승하게 된다.

이처럼 제어대상의 상호 간섭을 일으키는 시스템은 산업 현장에서 어렵지 않게 확인할 수 있다. 본 논문에서는 시스템의 출력이 상호 간섭을 일으키는 TITO 시스템에 대해 알아보기로 한다.

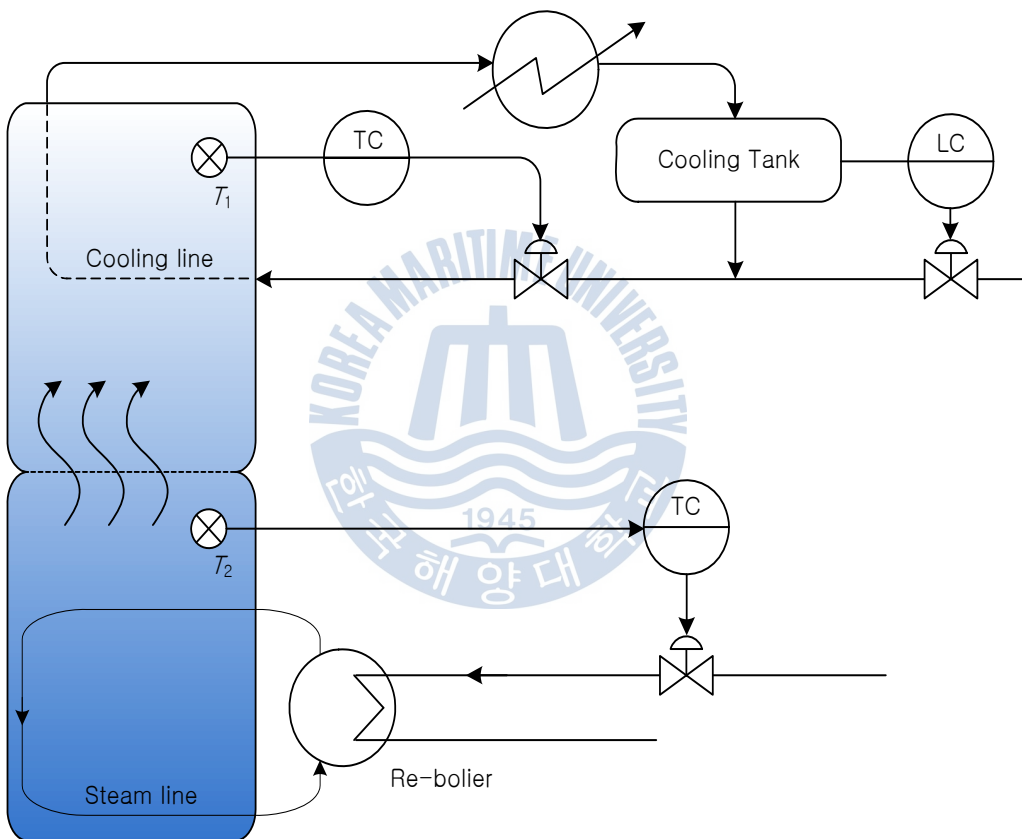


Fig. 3.2 Overhead & underneath temp. control of distillation columns

3.1.2 TITO 시스템

다변수 시스템 중에 앞에서 예로 들었던 경우와 같이 가장 흔히 접할 수 있는 TITO 시스템은 Fig 3.3과 같이 나타낼 수 있으며 두 개의 입력과 두 개의 출력으로 구성되어 있다. 또한, 그림에서 확인할 수 있듯이 TITO 시스템은 $G_{11}(s)$, $G_{12}(s)$, $G_{21}(s)$, $G_{22}(s)$ 로 분리될 수 있으며 $G_{12}(s)$, $G_{21}(s)$ 가 서로의 출력에 상호 간섭을 일으키고 있는 것을 알 수 있다.

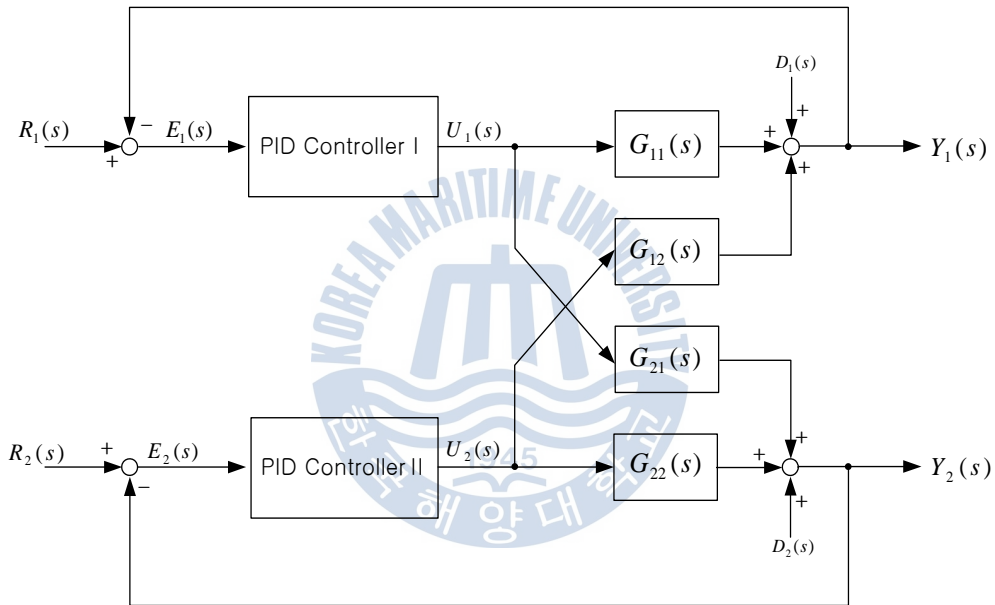


Fig. 3.3 Block diagram of TITO system

여기서 $R(s) \in \mathbb{R}^2$ 는 기준입력, $E(s) \in \mathbb{R}^2$ 는 오차, $U(s) \in \mathbb{R}^2$ 는 제어입력, $Y(s) \in \mathbb{R}^2$ 는 출력이다.

이러한 TITO 시스템의 전달함수행렬(transfer function matrix) $G(s)$ 는 식 (3.1)과 같다.

$$G(s) = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

위 그림에서 보듯이 각각의 제어입력은 PID제어기와 오차변수에 의하여 결정되며 이는 전달행렬을 제외한 대각행렬 PID제어기 형태로 표현하면 식 (3.2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$U(s) = \begin{bmatrix} U_1(s) \\ U_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{p1} + \frac{k_{i1}}{s} + k_{d1}s & 0 \\ 0 & k_{p2} + \frac{k_{i2}}{s} + k_{d2}s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_1(s) \\ E_2(s) \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

여기서 $k_{p1} + \frac{k_{i1}}{s} + k_{d1}s$ 와 $k_{p2} + \frac{k_{i2}}{s} + k_{d2}s$ 는 각각 PID제어기 I와 PID제어기 II를 의미한다.

식 (3.2)에서 각각의 이득행렬을 구하기 위해 식 (3.3)과 같이 변형시키면 다음과 같다.

$$U(s) = \begin{bmatrix} k_{p1} & 0 \\ 0 & k_{p2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_1(s) \\ E_2(s) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{i1} & 0 \\ 0 & k_{i2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{E_1(s)}{s} \\ \frac{E_2(s)}{s} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{d1} & 0 \\ 0 & k_{d2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s \cdot E_1(s) \\ s \cdot E_2(s) \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

여기서, $K_p \in R^{2 \times 2}$ 는 비례이득행렬, $K_i \in R^{2 \times 2}$ 는 적분이득행렬, $K_d \in R^{2 \times 2}$ 는 미분이득행렬이며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_p = \begin{bmatrix} k_{p1} & 0 \\ 0 & k_{p2} \end{bmatrix}, \quad K_i = \begin{bmatrix} k_{i1} & 0 \\ 0 & k_{i2} \end{bmatrix}, \quad K_d = \begin{bmatrix} k_{d1} & 0 \\ 0 & k_{d2} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

3.2 Z-N에 의한 PID제어기 설계

3.2.1 Z-N의 동조규칙

기존에 알려진 PID제어기 동조 방법 중 가장 대표적인 것은 Z-N의 동조법이

다. Ziegler와 Nichols는 주어진 시스템의 과도응답 특성을 기반으로 두 가지의 동조 규칙을 제시하였다.

첫 번째 방법은 단위계단입력에 대한 시스템 응답에 근거한 방법으로 개루프 동조법이고, 과도응답법이라고도 한다. 이 방법은 시스템에 적분기나 주요 폐루프 극점을 갖고 있지 않아서 단위계단 응답곡선이 S형으로 나올 경우에 사용할 수 있다. S형 곡선은 지연시간 L 과 시정수 T 로 나타낼 수 있는데, Fig. 3.4와 같이 S형 곡선의 변곡점에서의 접선과 시간축의 교점을 지연시간 L 이라 하고 접선과 정상상태에의 값 K 와의 교점을 시정수 T 라 한다.

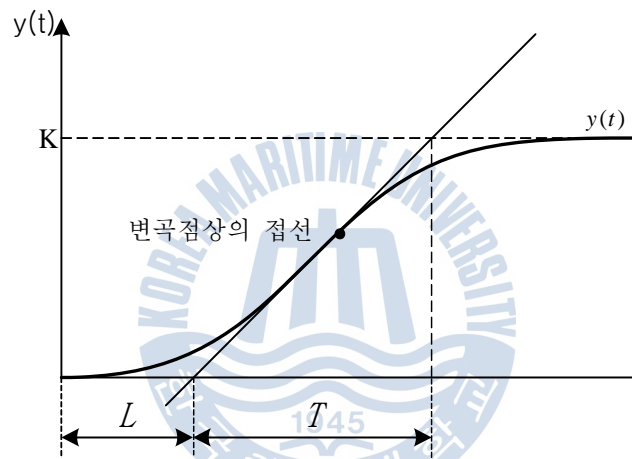


Fig. 3.4 Reaction curve for unit step input

Table 3.1은 Ziegler와 Nichols가 제안한 개루프 동조법의 동조규칙을 나타낸다[14].

Table 3.1 First method of Ziegler-Nichols tuning rule

Type of controller	K_p	T_i	T_d
P	T/L	∞	0
PI	$0.9T/L$	$L/0.3$	0
PID	$1.2T/L$	$2L$	$0.5L$

두 번째 방법은 적분시간 $T_i = \infty$, 미분시간 $T_d = 0$ 으로 설정하여 Fig. 3.5와 같이 비례제어기만을 갖는 폐루프 제어시스템을 구성하고 비레이득을 발산이나 감쇠하지 않는 일정한 진동을 일으킬 때까지 서서히 증감시킨다. 이렇게 해서 최초로 지속적인 진동이 일어날 때의 비레이득 값을 임계이득 K_{cr} 이라고 하며 이때 해당하는 임계주기 P_{cr} 을 실험적으로 구할 수 있다. 이를 페루프 동조법, 한계감도법이라고도 한다. 만약 어떤 비레이득 값에서도 출력이 진동을 일으키지 않으면 이 방법을 사용할 수 없다.

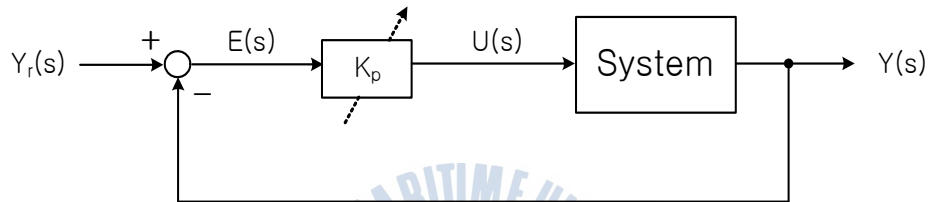


Fig. 3.5 Closed-loop control system with proportional control

Table 3.2는 Ziegler와 Nichols가 제안한 페루프 동조법의 동조규칙을 나타낸다[14].

Table 3.2 Second method of Ziegler-Nichols tuning rule

Type of controller	K_p	T_i	T_d
P	$0.5K_{cr}$	∞	0
PI	$0.45K_{cr}$	$1/1.2P_{cr}$	0
PID	$0.6K_{cr}$	$0.5P_{cr}$	$0.125P_{cr}$

3.2.2 Z-N에 의한 TITO 시스템의 PID제어기 설계

TITO 시스템은 두 개의 제어기 출력이 상호간에 영향을 주기 때문에 SISO 시스템처럼 바로 Z-N의 동조규칙을 적용할 수가 없다. 따라서 TITO 시스템을 두 개의 SISO 시스템으로 분리하는 것이 필요하다.

먼저 PID제어기 I을 설계하기 위해서 제어 입력 $U_2(s)$ 를 '0'으로 하면 Fig. 3.6과 같이 나타낼 수 있다.

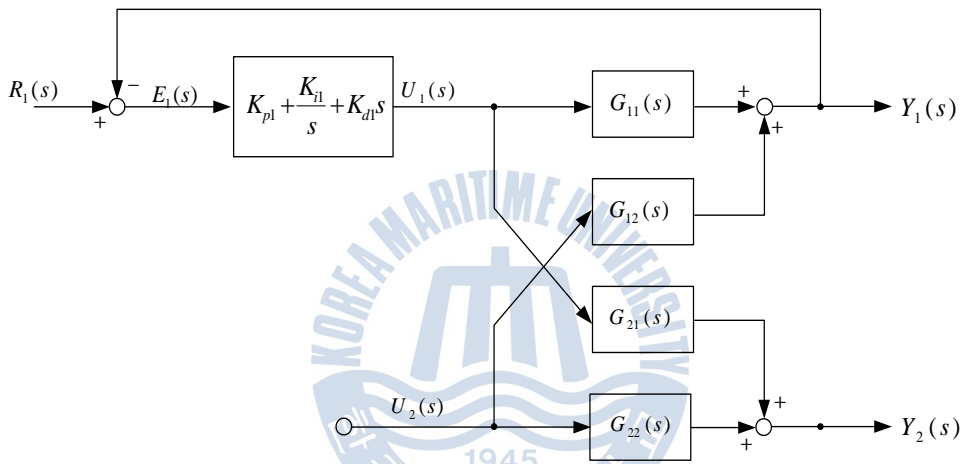
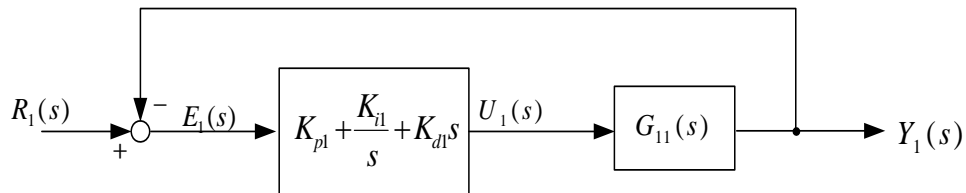
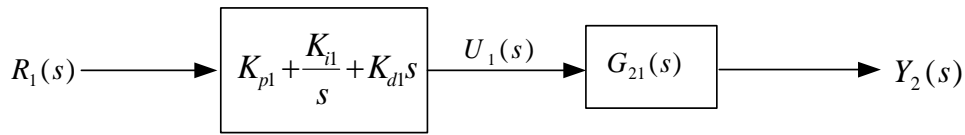


Fig. 3.6 Decoupled TITO system($U_2(s)=0$)

그러면 Fig. 3.6은 Fig. 3.7과 같이 입력 $R_1(s)$ 에 대한 두 개의 SISO 시스템으로 분리시킬 수 있다. 이 때 한 개의 SISO 시스템은 Fig. 3.7(a)와 같이 폐루프 시스템으로, 또 하나의 SISO 시스템은 Fig. 3.7(b)와 같이 개루프 시스템이 된다.



(a) Closed loop system



(b) Open loop system

Fig. 3.7 Decoupled TITO system($U_2(s)=0$)

Fig. 3.7(b)는 $R_1(s)$ 의 입력이 출력 $Y_2(s)$ 에 더해지는 외란이나 센서잡음처럼 반영되는 것으로 생각할 수 있으며 제어를 설계하는데 필요한 오차 $E_1(s)$ 에 영향을 미치지 않는다. 따라서 기준입력 $R_1(s)$ 에 대한 PID제어기 I 을 설계하기 위해서는 Fig. 3.7(a)만 고려하면 된다.

이번에는 반대로 PID제어기 II를 설계하기 위해서 Fig. 3.8과 같이 제어변수 $U_1(s)$ 를 제거하도록 한다.

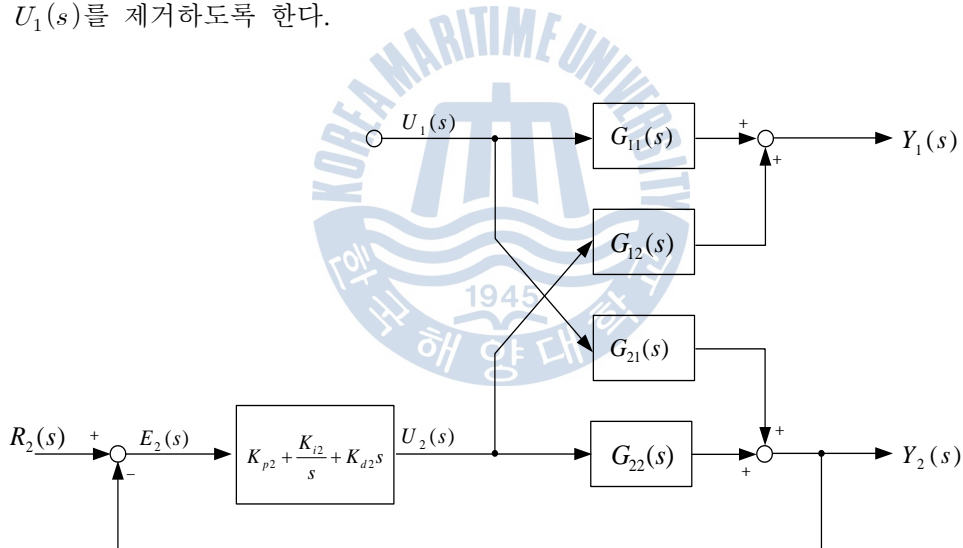
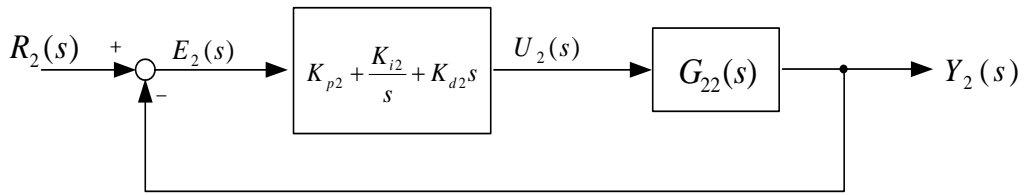
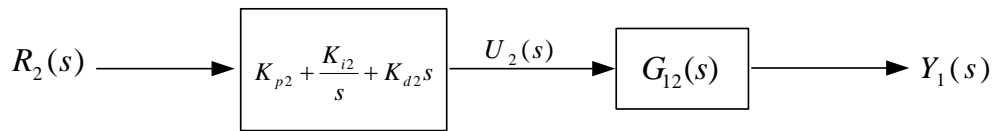


Fig. 3.8 Decoupled TITO system($U_1(s)=0$)

그러면 Fig. 3.8은 Fig. 3.9와 같이 입력 $R_2(s)$ 에 대한 두 개의 SISO 시스템으로 분리시킬 수 있다. 이 때 한 개는 Fig. 3.9(a)과 같은 페루프 시스템으로, 또 하나는 Fig. 3.9(b)와 같이 개루프 시스템이 된다.



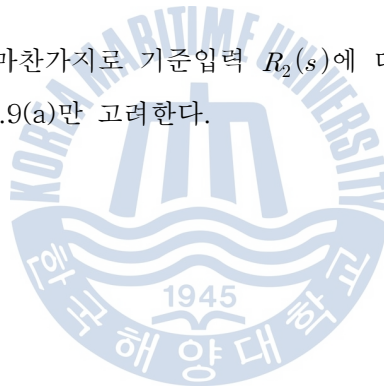
(a) Closed loop system



(b) Open loop system

Fig. 3.9 Decoupled TITO system ($U_1(s)=0$)

이 경우도 앞서와 마찬가지로 기준입력 $R_2(s)$ 에 대한 PID제어기 Π 를 설계하기 위해서는 Fig. 3.9(a)만 고려한다.



3.3 RCGA에 의한 TITO 시스템의 PID제어기 최적 동조

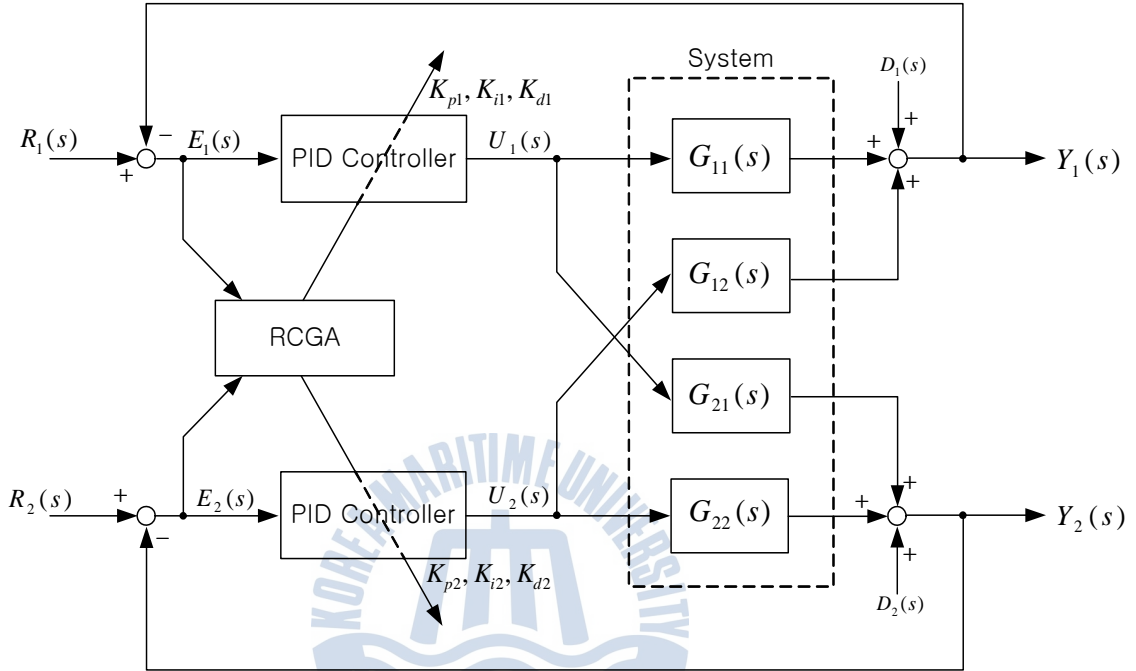


Fig 3.10 Optimal tuning of the PID controller using a RCGA

PID제어기 동조는 Z-N에 의한 방법이 널리 알려져 있고, 이를 이용한 제어기 설계방법은 앞 절에서 설명하였다. 본 논문에서는 RCGA를 이용하여 PID제어기의 파라미터를 탐색하고자 한다.

이때, PID제어기의 파라미터들은 각각 구간 $0 \leq K_p \leq K_p^{UL}$, $0 \leq K_i \leq K_i^{UL}$, $0 \leq K_d \leq K_d^{UL}$ 에서 탐색하며 K_p^{UL} , K_i^{UL} , K_d^{UL} 는 탐색될 PID제어기 파라미터의 상한 경계값이며, 이 값은 Z-N의 한계감도법에서 구한 매개변수, K_p , T_i , T_d 의 값을 기초로 설정한다.

RCGA는 파라미터를 탐색하는 과정에서 개체의 우열을 평가하기 위하여 목적함수로 적합도를 계산한다. RCGA는 목적함수를 선택하는데 있어서 매우 유연하기 때문에 시스템에 따라 어떤 형태의 함수를 목적함수로 취할 때 가장 적합한 제어를 할 수 있는지 쉽게 비교해 볼 수 있다.

RCGA로 제어기 파라미터를 탐색하는데 있어 세 가지 목적함수를 적용하도록 한다. 먼저 식 (3.5)과 같이 다봉의 특징을 가지는 탐색환경에서도 전역해를 얻을 수 있고, 도함수를 쉽게 얻을 수 있는 ‘제곱오차의 적분(Integral of the Square of the Error, ISE)’과, 식 (3.6)의 ‘절대오차의 적분(Integral of the Absolute magnitude of the Error, IAE)’, 그리고 식 (3.7)의 ‘시간곱 절대오차의 적분(Integral of the Time-Absolute Error, ITAE)’을 목적함수로 각각 이용하여 PID제어기의 이득값을 탐색한다.

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t)dt \quad (3.5)$$

$$IAE = \int_0^{\infty} |e|(t)dt \quad (3.6)$$

$$ITAE = \int_0^{\infty} t |e|(t)dt \quad (3.7)$$

위의 세가지 목적함수의 특징을 비교하면 ISE는 해석이 용이하여 최적제어기 설계 등에 자주 이용되나 오차가 클 때에는 큰 오프셋을, 작을 때에는 작은 오프셋을 주는 결과를 초래해 최적해 부근에서 계수의 변화에 둔감하다. 한편 IAE는 오차의 절대크기를 취함으로써 양이나 음의 오차에 균등한 오프셋을 부여하는 효과를 주므로 ISE보다 나은 감도를 나타낸다. ITAE는 장시간의 과도 현상에 대해 오프셋을 주는 매우 유용한 기준으로 IAE나 ISE보다 훨씬 더 변별력이 있으며, 이 적분의 최소값은 시스템의 파라미터들이 변하는 경우에 훨씬 더 잘 정의 될 수 있다[15].

제 4 장 시뮬레이션

제2장에서는 TITO 시스템의 PID제어기 파라미터를 탐색하기 위한 도구로 사용한 RCGA의 이론적 배경을 설명하였다. 제3장에서는 TITO 시스템의 개념과 구성, PID제어기 파라미터 동조에 있어 가장 보편적으로 사용되는 Z-N 동조법과 RCGA 기반의 PID제어기 파라미터 탐색법을 이용하여 제어기를 설계하는 방법을 설명하였다. 따라서 제4장에서는 두 개의 시스템 모델[16]을 선정하여 각 시스템 모델에 대해 제3장에서 설명한 두 형태의 제어기를 설계한 후 적용하여 제어기의 유효성을 시뮬레이션을 통해 검증한다.

예제 시스템 I 은 $G_{11}(s)$ 과 $G_{22}(s)$ 는 3차 시스템으로 그 값이 동일하고 상호 간섭하는 $G_{12}(s)$ 와 $G_{21}(s)$ 는 서로 다른 4차 시스템으로 구성되어 있다. 예제 시스템 II는 전달함수가 모두 다른 4차 시스템으로 구성되어 있다.

4.1 예제 시스템 I

4.1.1 Z-N의 동조규칙을 이용한 PID제어기

식 (4.1)과 같은 전달함수를 갖는 선형화된 TITO 시스템에 대해 PID제어기를 설계하도록 한다.

$$G(s) = \frac{1}{(1+0.1s)(1+0.2s)^2} \begin{bmatrix} 1 & \frac{-2.4}{(1+0.5s)} \\ \frac{0.5}{(1+0.1s)} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

3.2절에 따라 $G_{11}(s)$ 에 대하여 한도감도법을 적용하기 위해 임계 비레이득값을 K_{cr} 이라 하고 전달함수를 구하면 식 (4.3)과 같다.

$$G_{11}(s) = \frac{1}{0.004s^3 + 0.08s^2 + 0.5s + 1} \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned} \frac{Y_1(s)}{R_1(s)} &= \frac{\frac{1}{0.004s^3 + 0.08s^2 + 0.5s + 1} \cdot K_{cr}}{1 + \frac{1}{0.004s^3 + 0.08s^2 + 0.5s + 1} \cdot K_{cr}} \\ &= \frac{250 K_{cr}}{s^3 + 20s^2 + 125s + 250K_{cr} + 250} \end{aligned} \quad (4.3)$$

출력이 일정 진폭의 진동을 유발하게 하는 안정한계의 K_{cr} 값은 Routh-Hurwitz¹⁾의 안정도 판별법에 의하여 구할 수 있다. 페루프 시스템의 특성방정식은 식 (4.4)과 같다

$$s^3 + 20s^2 + 125s + 250K_{cr} + 250 = 0 \quad (4.4)$$

또한, Routh배열은 다음과 같다.

s^3	1	125
s^2	20	$250K_{cr} + 250$
s^1	$\frac{(20 \times 125) - (250K_{cr} + 250)}{20}$	

Routh배열에서, 출력이 일정 진폭의 진동을 유발하게 하는 안정한계 상태는 $K_{cr} = 9$ 일 때임을 알 수 있으며, 이 때 특성방정식은 식 (4.5)과 같다.

$$s^3 + 20s^2 + 125s + 2500 = 0 \quad (4.5)$$

K_{cr} 의 값을 9로 하여 단위계단응답을 구해보면 Fig. 4.1과 같이 일정한 진폭으로 지속적으로 진동하게 된다.

1) 이 판별법은 특성방정식이 상수 계수를 가지는 선형시불변계통의 절대 안정도에 관한 정보를 제공하는 대수적 방법이다. 이 판별법은 특성방정식의 근 중 그 어느 하나가 s평면의 우반면에 놓여 있는지를 검사한다. s평면의 $j\omega$ 축위나 s평면의 우반면에 놓여 있는 특성근의 수도 제시한다.

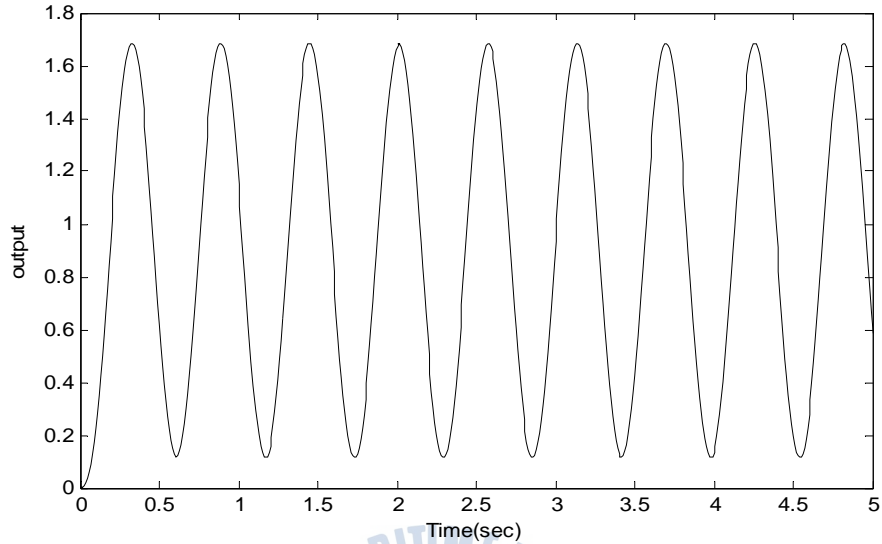


Fig. 4.1 Step responses using critical proportional gain($K_{cr} = 9$)

다음으로 진동주파수를 찾기 위하여 식 (4.5)에 $s = j\omega$ 를 대입하면 식 (4.6)과 같이 되므로 찾고자 하는 진동의 각속도는 $\omega = 11.2$ 이고, 진동주기 P_{cr} 은 $2\pi/\omega$ 에서 0.56으로 된다.

$$(j\omega)^3 + 20(j\omega)^2 + 125(j\omega) + 2500 = 0 \quad (4.6)$$

따라서 Table 3.2로부터 PID제어기의 파라미터 K_p, T_i, T_d 를 식 (4.7)과 같이 결정할 수 있다.

$$\begin{aligned} K_{p1} = K_{p2} &= 0.6K_{cr} = 5.4 \\ T_{i1} = T_{i2} &= 0.5P_{cr} = 0.28 \\ T_{d1} = T_{d2} &= 0.125P_{cr} = 0.07 \end{aligned} \quad (4.7)$$

4.1.2 RCGA를 이용한 PID제어기

RCGA는 최적화 문제를 다루는데 있어서 매우 우수한 방법이지만 미지의

PID제어기 파라미터를 찾기 위해서는 큰 범위의 탐색범위가 필요하다. 이는 필연적으로 연산시간이 길어지게 되는 단점을 가진다.

따라서 본 논문에서는 Z-N 이득 값을 RCGA의 탐색범위를 선정하는 하나의 기준으로 사용하도록 한다.

RCGA의 제어 변수는 각각 집단의 크기 $N = 20$, 재생산 계수 $\eta = 1.8$, 교배 확률 $P_c = 0.9$, 돌연변이 확률 $P_m = 0.2$ 를 사용하였으며, PID제어기 파라미터의 상한 경계값 K_p^{UL} , K_i^{UL} , K_d^{UL} 은 Table 4.1에 나타난 Z-N의 파라미터 값을 참조하고, 충분한 여유를 포함하여 모두 25로 통일하였다.

목적함수는 세 가지 경우로 하여 제어기 파라미터를 탐색하였다. Fig. 4.2는 ISE를 목적함수로 하고, Fig. 4.3은 IAE를 목적함수로 하였으며, Fig. 4.4는 ITAE를 목적함수로 하여 제어기 파라미터를 탐색하는 과정을 나타낸 것이다.

$$J_0 = \int_0^{\infty} (e_1^2 + e_2^2)(t)dt \quad (4.8)$$

$$J_0 = \int_0^{\infty} (|e_1| + |e_2|)(t)dt \quad (4.9)$$

$$J_0 = \int_0^{\infty} (t \cdot |e_1| + t \cdot |e_2|)(t)dt \quad (4.10)$$

Table 4.1은 Z-N의 동조법과 RCGA에 기초한 PID제어기의 이득값을 나타낸다.

Table. 4.1 Gains of PID Controllers by Z-N and RCGA

		K_{p1}	K_{p2}	K_{i1}	K_{i2}	K_{d1}	K_{d2}
	Z-N	5.4	5.4	19.2857	19.2857	0.3780	0.3780
RCGA	ISE	11.3430	16.6527	24.9999	22.5154	1.5145	9.2292
	IAE	8.1001	15.7398	22.9063	23.8527	0.8025	2.4135
	ITAE	8.3303	10.6636	23.7362	23.1262	0.9119	1.2002

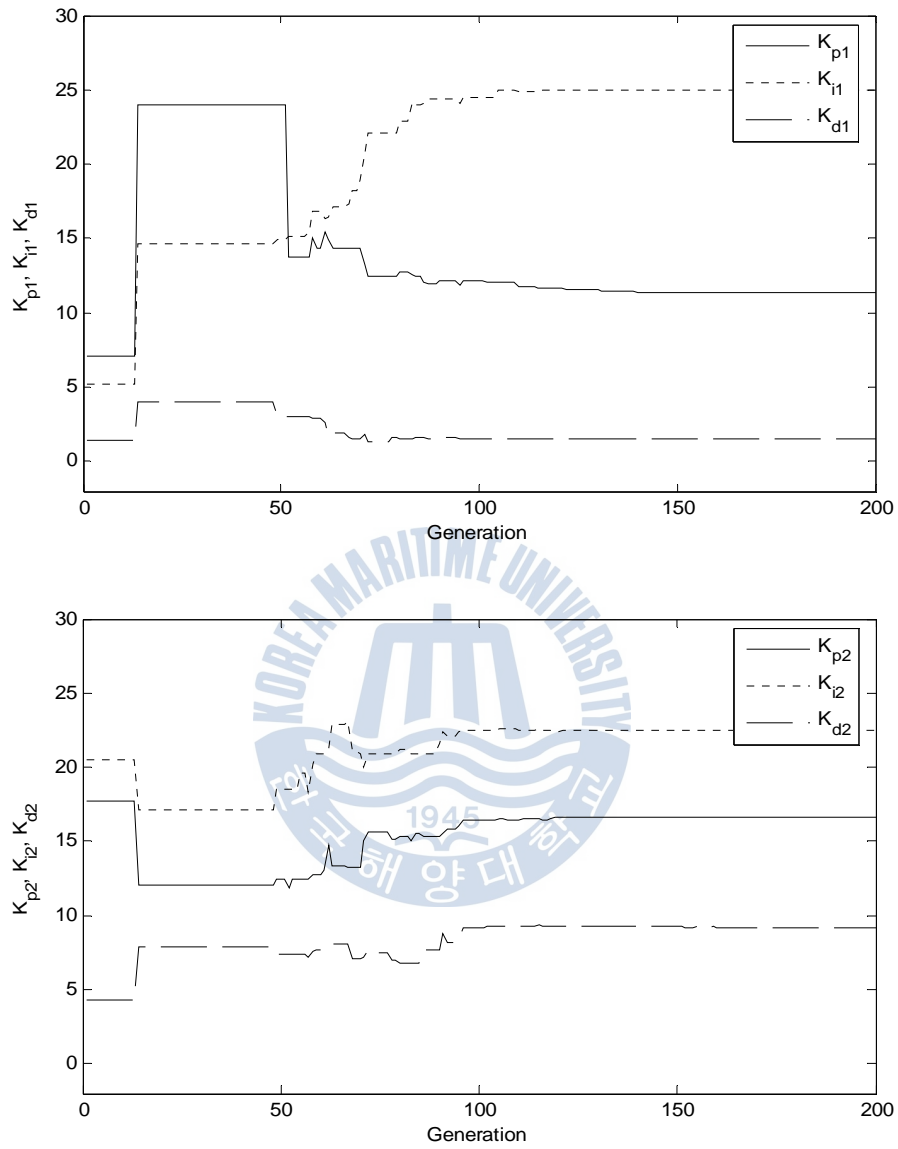


Fig. 4.3 Parameter estimation of TITO system using RCGA(Obj.: ISE)

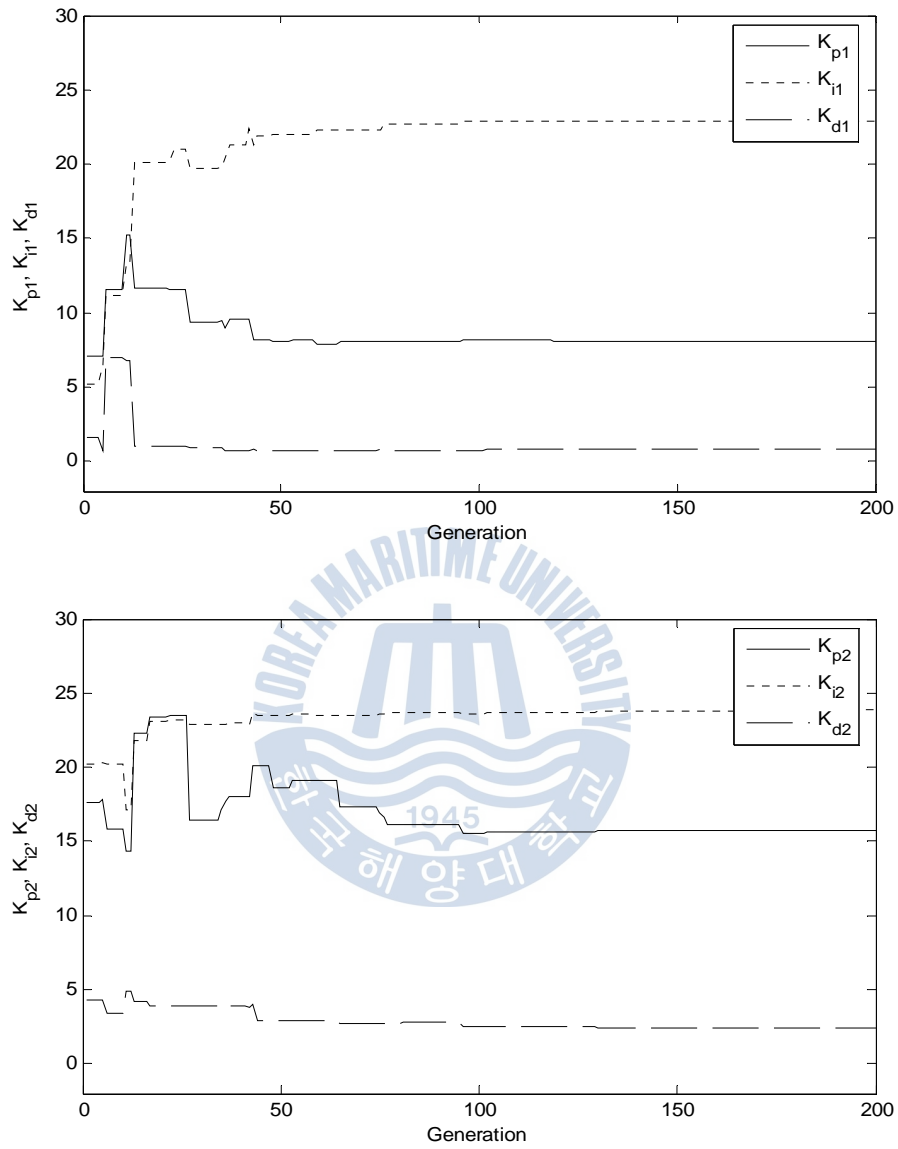


Fig. 4.2 Parameter estimation of TITO system using RCGA(Obj.: IAE)

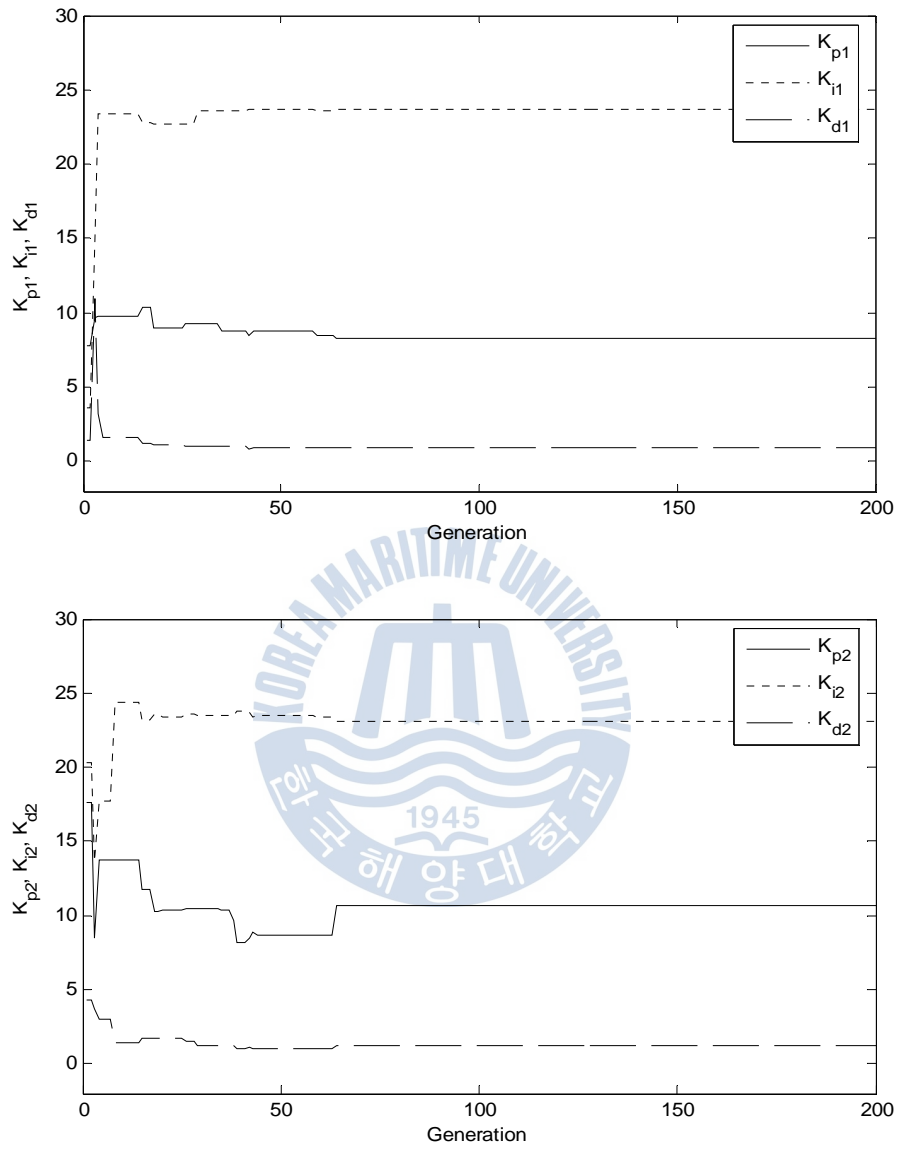


Fig. 4.3 Parameter estimation of TITO system using RCGA(Obj.: ITAE)

4.1.3 응답 특성

시스템 모델에 Table 4.1과 같이 설계된 PID제어기를 구성하고 단위계단 입력을 가하여 응답특성을 비교한다.

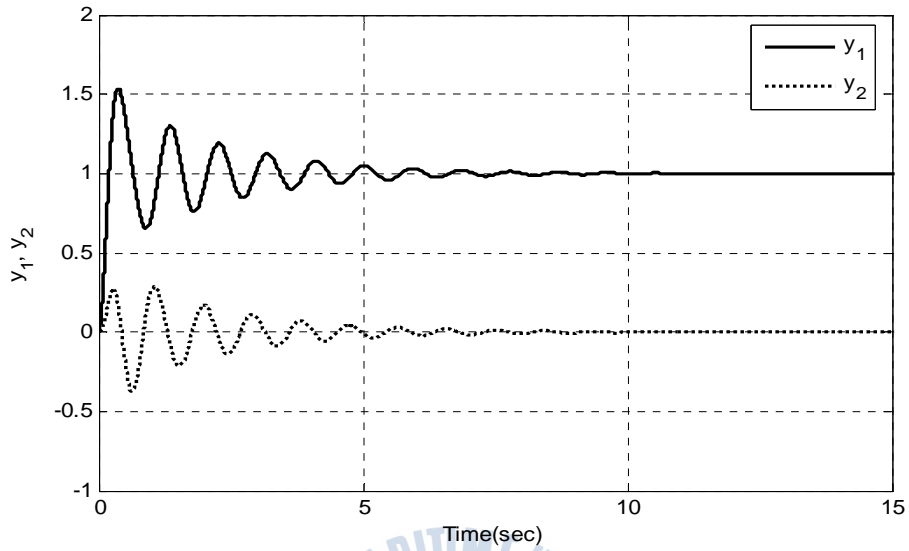
각각의 제어기에 입력 $r(t) = [1 \ 0]^T$ 를 주고, 출력 $y(t) = [y_1(t) \ y_2(t)]^T$ 와 제어입력 $u(t) = [u_1(t) \ u_2(t)]^T$ 를 확인하였다.

Fig. 4.5은 Z-N의 동조법으로 구한 PID제어기의 이득으로 시뮬레이션 한 경우이고, Fig. 4.6부터 Fig 4.8까지는 각각 RCGA로 구한 PID제어기의 이득으로 시뮬레이션 한 경우이다. 이때 Fig. 4.6은 목적함수로 ISE를 사용한 경우이고, Fig. 4.7은 IAE를, Fig. 4.8은 ITAE를 목적함수로 사용한 결과이다.

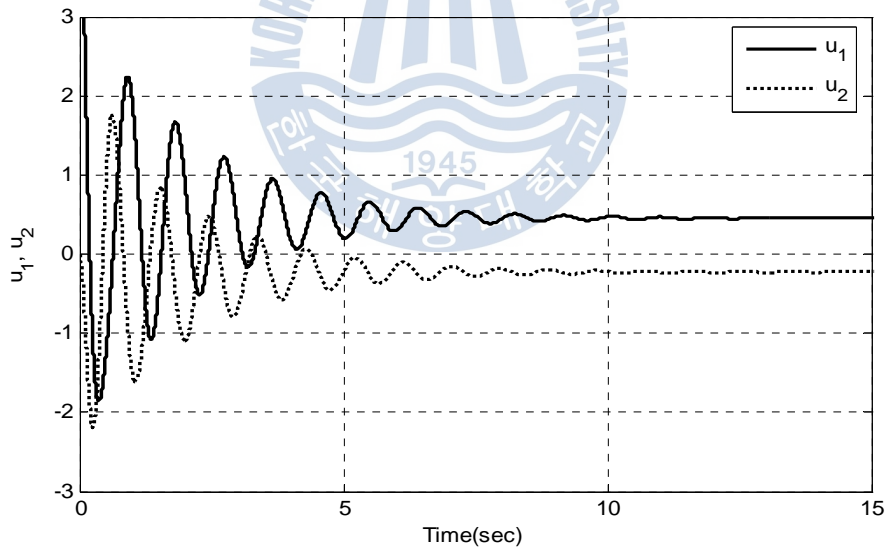
우선 Fig. 4.5와 Fig. 4.6을 비교해 보면, Z-N의 동조법은 약 11초 지점에서 $y_1(t)$ 의 값은 1로 안정되고, $y_2(t)$ 의 값은 11초 지점에서 0으로 안정된다. 그러나 RCGA에 의한 제어는 대략 1초 내외에서 출력 $y_1(t)$ 은 1로 $y_2(t)$ 는 0으로 수렴하여 안정되므로 Z-N의 동조법보다 약 10배정도 빠르게 안정되는 것을 볼 수 있다.

목적함수를 다르게 하여 RCGA로 탐색된 제어기의 응답 특성을 상세히 비교해 보면, ISE의 경우 Fig. 4.6과 같이 제어입력이 가장 크고 출력 $y_1(t)$ 가 세 가지 중에 가장 빠른 시간에 안정된다. 또한 출력 $y_2(t)$ 에 대해서도 가장 좋은 응답을 보이고 있다. IAE의 경우 Fig. 4.7과 같이 -5에서 8 사이의 제어입력이 들어가고 이는 세 가지 목적함수 중에 가장 작은 제어입력을 요구한다. 출력 $y_1(t)$ 은 0.3초에서 1.45의 오버슈트가 발생하고 1.2초에서 1로 수렴하며 출력 $y_2(t)$ 는 0.2초에서 0.1의 오버슈트가 있으며 0.7초 정도에서 0으로 수렴한다. ITAE의 경우 Fig. 4.8와 같이 세 가지 중에서 출력 $y_1(t)$ 에 대하여 가장 작은 오버슈트를 보여주고 있으나 안정되기까지 1.2초정도로 ISE보다 느리다. 또한 출력 $y_2(t)$ 에 대해서는 세 가지 중에서 0.2로 가장 큰 오버슈트를 보이고 있다. 목적 함수에 따라 조금씩 차이점이 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 4.9는 세 목적함수 값에 따른 출력 $y_1(t)$, $y_2(t)$ 의 값을 비교한 그래프이다.

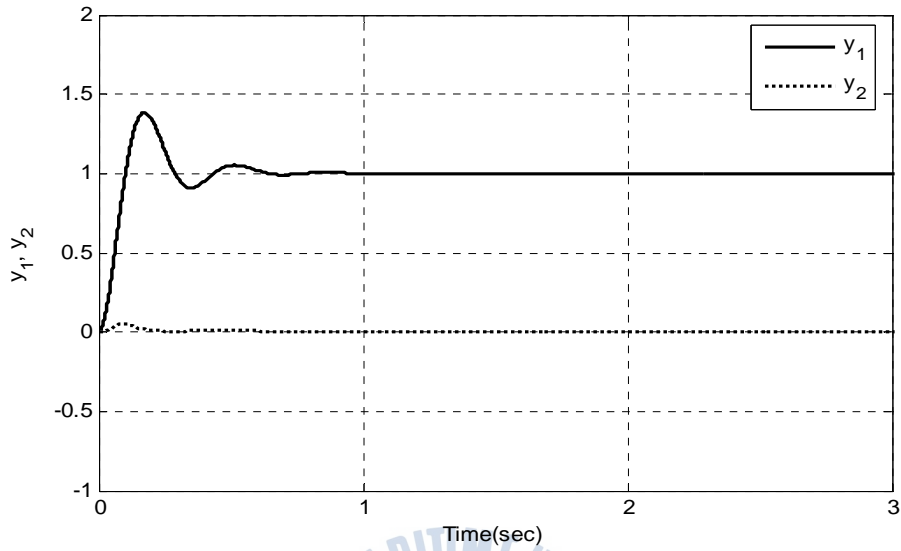


(a) Outputs of TITO systems : $y_1(t)$, $y_2(t)$

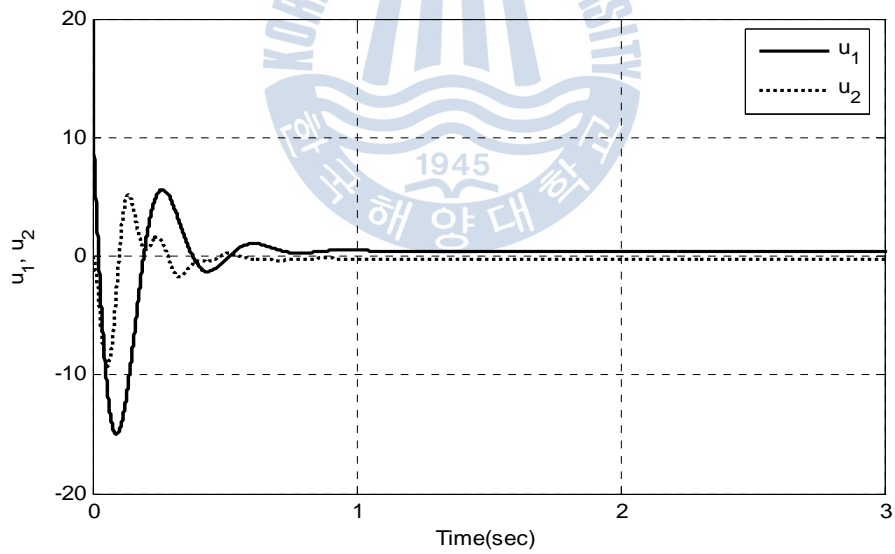


(b) Control inputs : $u_1(t)$, $u_2(t)$

Fig. 4.5 Responses of PID controllers by Z-N

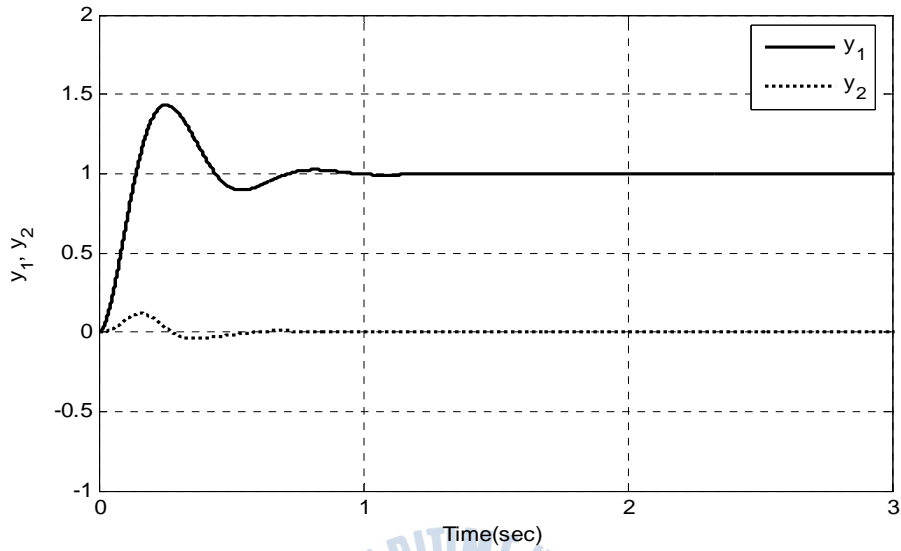


(a) Outputs of TITO systems : $y_1(t)$, $y_2(t)$

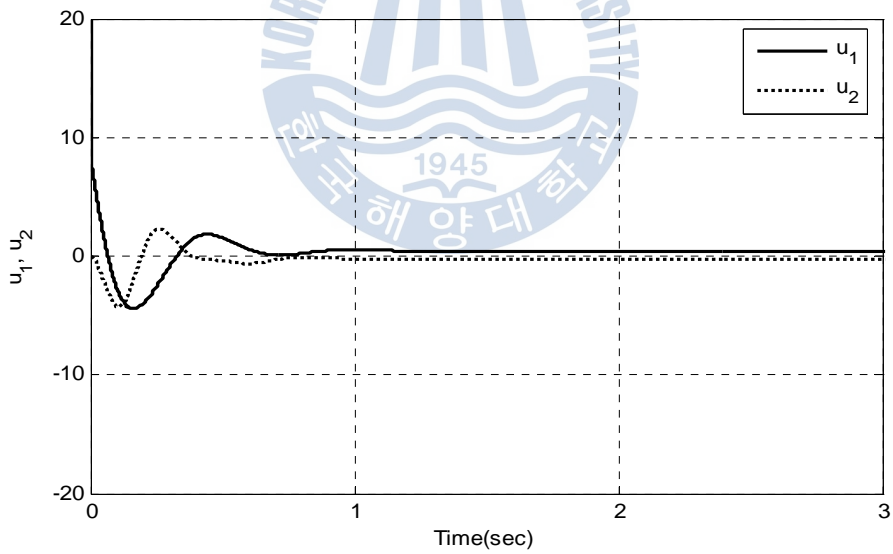


(b) Control inputs : $u_1(t)$, $u_2(t)$

Fig. 4.6 Responses of PID controllers using RCGA
(Object function : ISE)

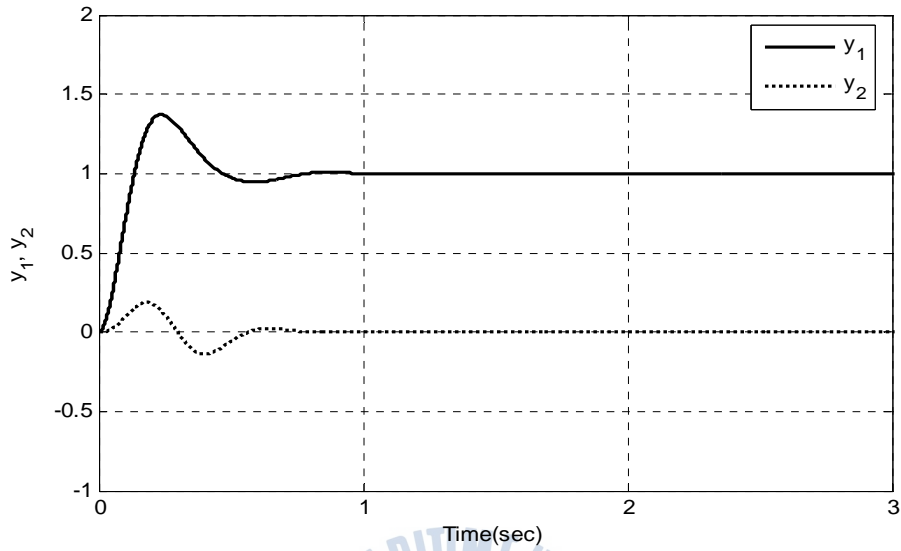


(a) Outputs of TITO systems : $y_1(t)$, $y_2(t)$

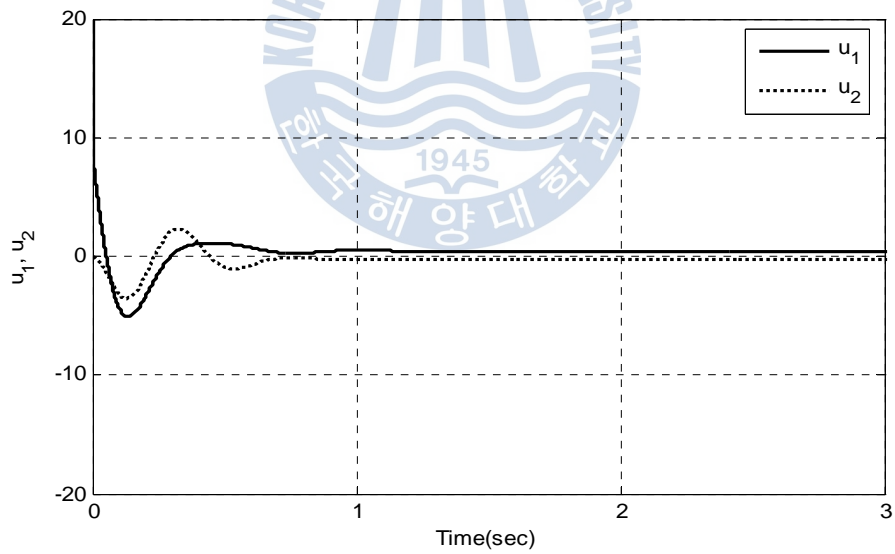


(b) Control inputs : $u_1(t)$, $u_2(t)$

Fig. 4.7 Responses of PID controllers using RCGA
(Object function : IAE)

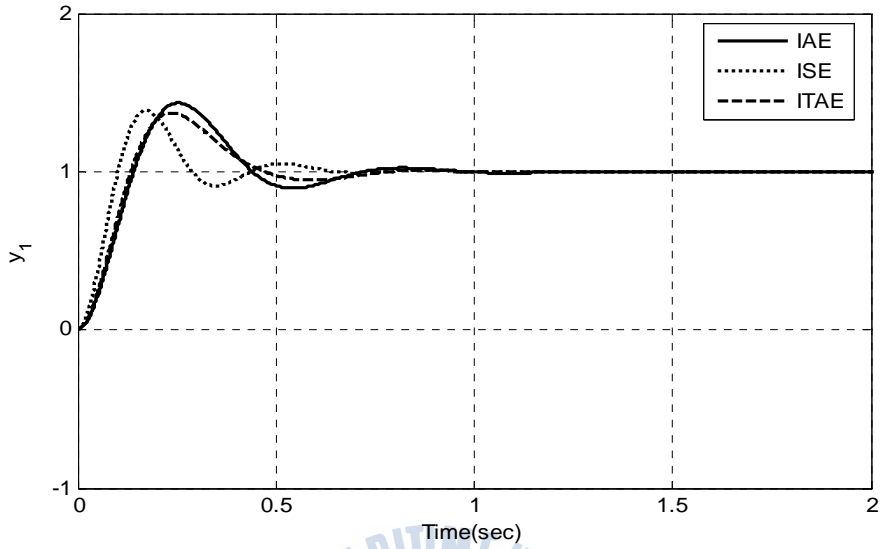


(a) Outputs of TITO systems : $y_1(t)$, $y_2(t)$

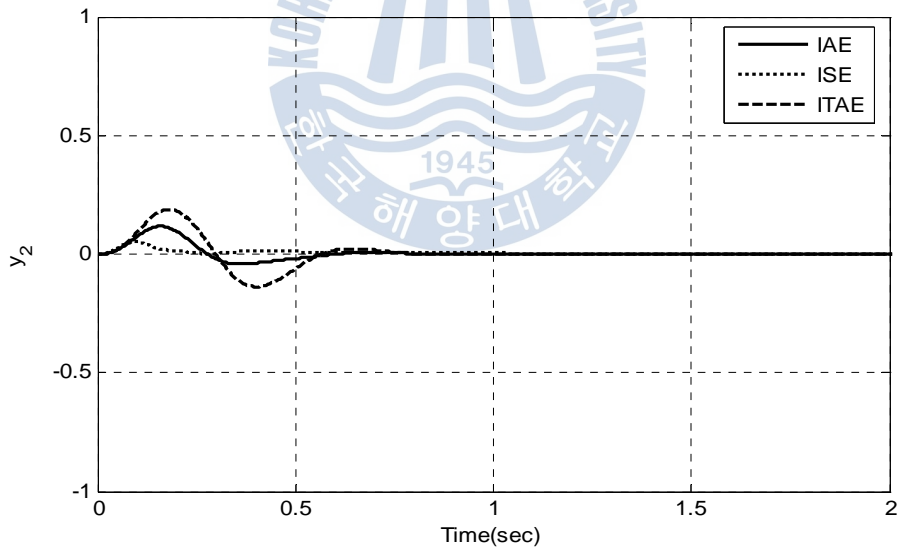


(b) Control inputs : $u_1(t)$, $u_2(t)$

Fig. 4.8 Responses of PID controllers using RCGA
(Object function : ITAE)



(a) Output : $y_1(t)$



(b) Output : $y_2(t)$

Fig. 4.9 Comparison of responses using RCGA

이번에는 외란에 대한 제어성능을 알아보기 위해 5초에서 출력 $y_1(t)$ 에 -0.5 의 외란을 가하였다. 이 때 PID제어기는 목적함수를 ITAE로 설정한 이득값을 사용하였다. TITO 시스템은 두 개의 입·출력이 서로 상호 간섭을 일으키기 때문에 외란에 의해 변화된 제어입력 $u_1(t)$ 이 출력 $y_2(t)$ 에도 영향이 미치지만 외란이 발생했을 때에도 빠른 시간 내에 출력 $y_1(t)$, $y_2(t)$ 가 안정되는 것을 Fig. 4.10에서 알 수 있다.

이제 위의 제어기에 목표치를 변경했을 때의 제어 성능을 확인하기 위하여 3초마다 기준입력 $r_1(t)$ 을 각각 1, 0, -1 로 수정했다. Fig 4.11에서 출력 $y_1(t)$ 와 출력 $y_2(t)$ 가 변경된 목표치에 수렴하여 빠르게 안정되는 것을 볼 수 있으며, 외란을 적용했을 때와 같이 목표치 수정할 때마다 출력 $y_2(t)$ 가 영향을 받는 것을 볼 수 있다.



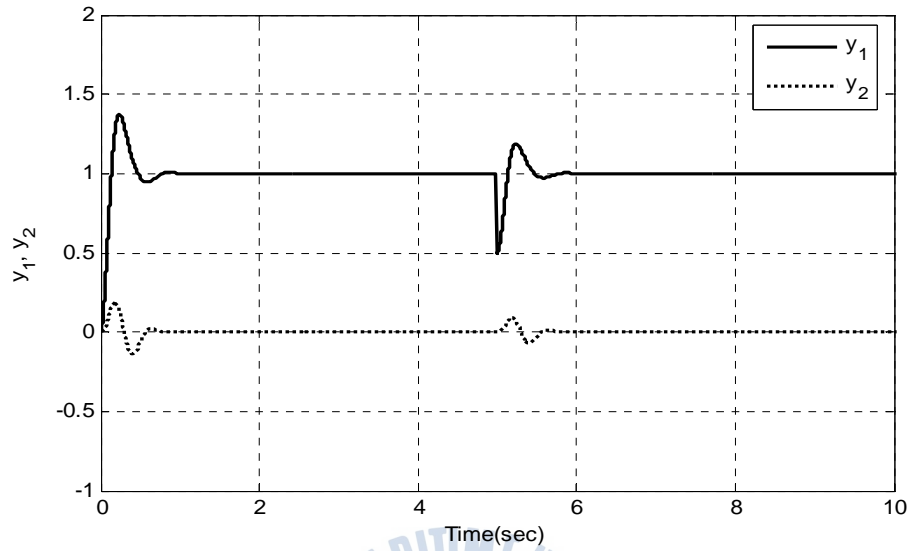


Fig. 4.10 Responses of PID controllers using RCGA for disturbance

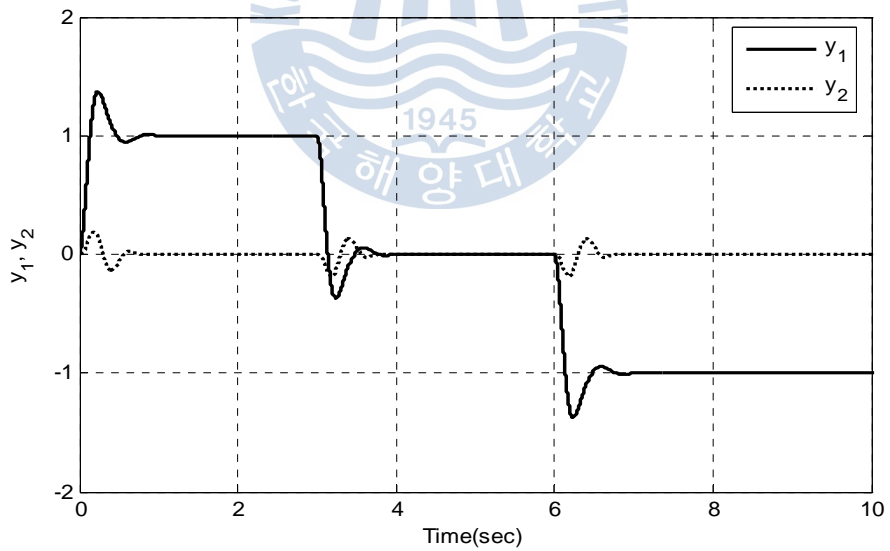


Fig. 4.11 Responses of PID controllers using RCGA for variable set-points

4.2 예제 시스템 II

4.2.1 Z-N의 동조규칙을 이용한 PID제어기

본 논문이 제시한 방법의 이해를 돕기 위해서 또 다른 예제를 들기로 한다. 식 (4.8)과 같은 전달함수를 갖는 TITO 시스템의 PID제어기를 설계한다.

$$G(s) = \frac{1}{(1+s)(1+2s)^2(1+0.5s)} = \begin{bmatrix} (1.5s+1) & 0.2(0.75s+1) \\ 0.6(0.75s+1) & 0.8(1.2s+1) \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

식 (4.11)은 다음과 같이 전개된다.

$$G(s) = \begin{bmatrix} \frac{1.5s+1}{2s^4+8s^3+10.5s^2+5.5s+1} & \frac{0.15s+0.2}{2s^4+8s^3+10.5s^2+5.5s+1} \\ \frac{0.45s+0.6}{2s^4+8s^3+10.5s^2+5.5s+1} & \frac{0.96s+0.8}{2s^4+8s^3+10.5s^2+5.5s+1} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

여기서 $G_{11}(s)$ 에 대한 임계 비례이득값 K_{cr1} 을 구하면 식 (4.14)와 같다.

$$G_{11}(s) = \frac{1.5s+1}{2s^4+8s^3+10.5s^2+5.5s+1} \quad (4.13)$$

$$\begin{aligned} \frac{Y(s)}{R(s)} &= \frac{\frac{1.5s+1}{2s^4+8s^3+10.5s^2+5.5s+1} \cdot K_{cr1}}{1 + \frac{1.5s+1}{2s^4+8s^3+10.5s^2+5.5s+1} \cdot K_{cr1}} \\ &= \frac{(1.5s+1) \cdot K_{cr1}}{2s^4+8s^3+10.5s^2+(1.5K_{cr1}+5.5)s+(K_{cr1}+1)} \end{aligned} \quad (4.14)$$

이 폐루프 시스템의 특성방정식 식 (4.15)과 같다.

$$2s^4+8s^3+10.5s^2+(1.5K_{cr1}+5.5)s+(K_{cr1}+1)=0 \quad (4.15)$$

또한, Routh배열은 다음과 같다.

$$\begin{array}{r}
 s^4 \quad \quad 2 \quad \quad \quad 10.5 \quad \quad K_{cr1} + 1 \\
 s^3 \quad \quad 8 \quad \quad \quad 1.5K_{cr1} + 5.5 \\
 s^2 \quad \frac{84 - 3K_{cr1} - 11}{8} \quad K_{cr1} + 1 \\
 s^1 \quad \frac{\frac{84 - 3K_{cr1} - 11}{8} \times (1.5K_{cr1} + 5.5) - 8(K_{cr1} + 1)}{\frac{84 - 3K_{cr1} - 11}{8}}
 \end{array}$$

여기서 s^1 을 정리하면 식 (4.16)과 같다.

$$s^1 = \frac{-4.5K_{cr1}^2 + 29K_{cr1} + 337.5}{-3K_{cr1} + 73} \quad (4.16)$$

이때 시스템이 안정하려면 부호의 변화가 일어나면 안 되기 때문에 s^2 의 분자가 양수이어야 하고, 동시에 s^1 의 분자도 양수이어야 한다. 또한 K_{cr1} 은 양수라는 조건도 추가된다.

$$\begin{aligned}
 -3K_{cr1} + 73 &> 0, \\
 -4.5K_{cr1}^2 + 29K_{cr1} + 337.5 &> 0, \\
 K_{cr1} &> 0
 \end{aligned}$$

결국, 이 세 개의 부등식이 공통으로 나타내는 영역에 해당하는 K_{cr1} 을 사용하면 시스템이 안정하다는 것을 의미한다. 위의 부등식을 풀면 공통 범위는 $0 < K_{cr1} < 12.4625$ 이 된다. 만약 K_{cr1} 이 12.4625와 같거나 크면 이 시스템은 발산하므로, 임계이득 K_{cr1} 은 12.4625가 되고, 특성방정식은 식 (4.17)과 같다.

$$2s^4 + 8s^3 + 10.5s^2 + 18.69375s + 13.4625 = 0 \quad (4.17)$$

K_{cr1} 의 값을 12.4625로 하여 단위계단응답을 구해보면 Fig. 4.12과 같이 일정한 진폭으로 지속적으로 진동하게 된다.

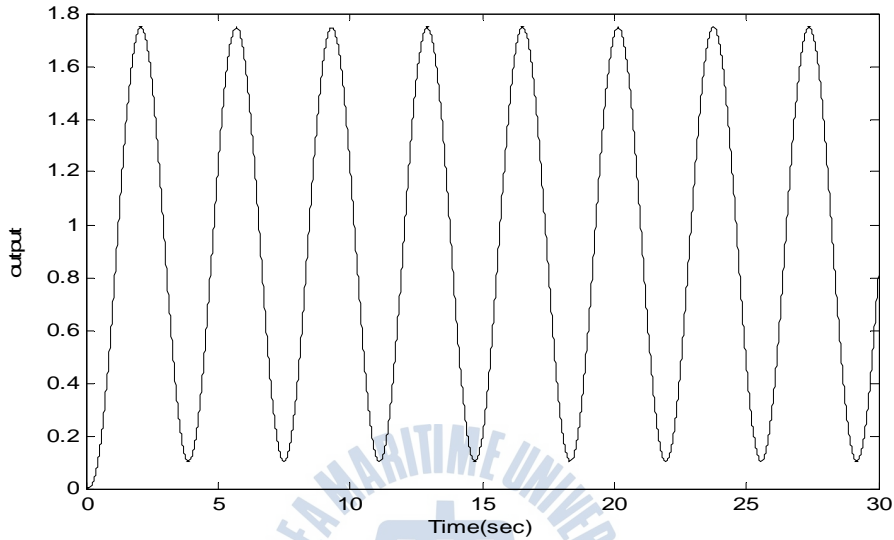


Fig. 4.12 Step responses using critical proportional gain ($K_{cr1} = 12.4625$)

그리고 진동주파수를 찾기 위하여 식 (4.17)에 $s = j\omega$ 를 대입하면 식 (4.18)와 같이 되므로 찾고자 하는 진동의 각속도는 $\omega_1 = 1.73$ 이고, 진동주기 P_{cr1} 은 $2\pi/\omega$ 에서 3.62가 된다.

$$2(j\omega)^4 + 8(j\omega)^3 + 10.5(j\omega)^2 + 18.69375(j\omega) + 13.4625 = 0 \quad (4.18)$$

같은 방법으로 G_{22} 에 대하여 Routh-Hurwitz의 안정도 판별법을 이용하여 임계이득 K_{cr2} 를 구해본다. $G_{22}(s)$ 는 식 (4.19)와 같고 이에 대한 임계값 K_{cr2} 를 구하기 위해 전달함수를 구하면 식 (4.20)과 같다.

$$G_{22}(s) = \frac{0.96s + 0.8}{2s^4 + 8s^3 + 10.5s^2 + 5.5s + 1} \quad (4.19)$$

$$= \frac{(0.96s + 0.8) \cdot K_{cr2}}{2s^4 + 8s^3 + 10.5s^2 + (0.96K_{cr2} + 5.5)s + (0.8K_{cr2} + 1)} \quad (4.20)$$

$G_{22}(s)$ 에 대한 페루프 시스템의 특성방정식은 식 (4.21)과 같다.

$$2s^4 + 8s^3 + 10.5s^2 + (0.96K_{cr2} + 5.5)s + (0.8K_{cr2} + 1) = 0 \quad (4.21)$$

또한, Routh배열은 다음과 같다.

$$\begin{array}{rcccc} s^4 & 2 & 10.5 & 0.8K_{cr2} + 1 & \\ s^3 & 8 & 0.96K_{cr2} + 5.5 & & \\ s^2 & \frac{84 - 1.92K_{cr2} - 11}{8} & 0.8K_{cr2} + 1 & & \\ s^1 & \frac{\frac{84 - 1.92K_{cr2} - 11}{8} \times (0.96K_{cr2} + 5.5) - 8(0.8K_{cr2} + 1)}{\frac{84 - 1.92K_{cr2} - 11}{8}} & & & \end{array}$$

위와 같고 여기서 s^1 을 정리하면 식 (4.22)와 같다.

$$s^1 = \frac{-1.8432K_{cr2}^2 - 8.32K_{cr2} + 337.5}{-1.92K_{cr2} + 73} \quad (4.22)$$

이때 시스템이 안정하려면 부호의 변화가 일어나면 안 되기 때문에 s^2 의 분자가 양수이어야 하고, 동시에 s^1 의 분자도 양수이어야 한다. 또한 K_{cr2} 은 양수라는 조건도 추가된다.

$$\begin{aligned} -1.92K_{cr2} + 73 &> 0, \\ -1.8432K_{cr2}^2 - 8.32K_{cr2} + 337.5 &> 0, \\ K_{cr2} &> 0 \end{aligned}$$

결국, 이 세 개의 부등식이 공통으로 나타내는 영역에 해당하는 K_{cr2} 을 사용하면 시스템이 안정하다는 것을 의미한다. 위 세 개의 부등식을 풀면 공통 범위는 $0 < K_{cr2} < 15.9755$ 이 된다. 만약 K_{cr2} 이 15.9755와 같거나 크면 이 시스템

은 발산하므로, 임계이득 K_{cr2} 는 15.9755가 되고, 이를 식 (4.21)에 대입하면 아래와 같다.

$$2s^4 + 8s^3 + 10.5s^2 + 20.83648s + 13.7804 = 0 \quad (4.23)$$

K_{cr2} 의 값을 15.9755로 하여 단위계단응답을 구해보면 Fig. 4.13과 같이 일정한 진폭으로 지속적으로 진동하게 된다.

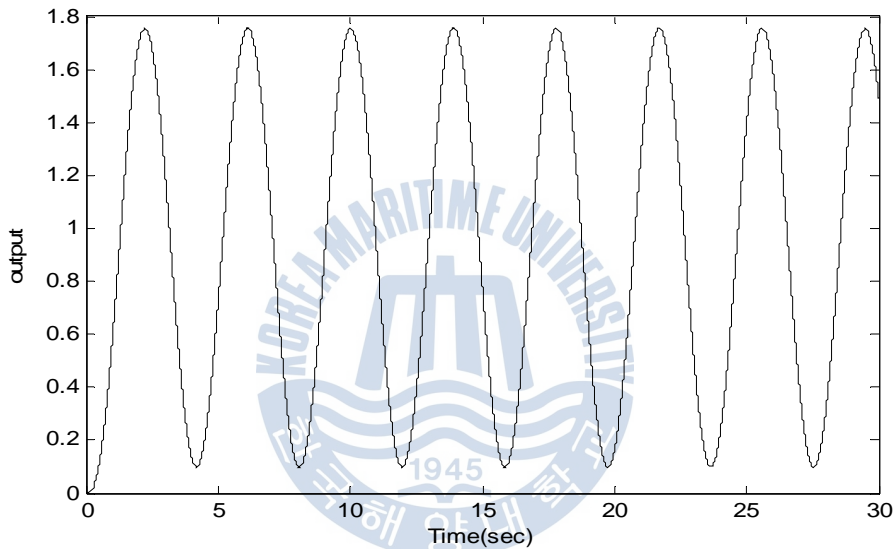


Fig. 4.13 Step responses using critical proportional gain ($K_{cr2} = 15.9755$)

그리고 진동주파수를 찾기 위하여 특성방정식에 $s = j\omega$ 를 대입하면 식 (4.23)과 같이 되므로 찾고자 하는 진동의 각속도는 $\omega_2 = 1.61$ 이고, 진동주기 P_{cr2} 은 $2\pi/\omega$ 에서 3.89가 된다.

$$2(j\omega)^4 + 8(j\omega)^3 + 10.5(j\omega)^2 + 20.83648(j\omega) + 13.7804 = 0 \quad (4.23)$$

따라서 Table 3.2로부터 지금까지 구한 K_{cr1} , K_{cr2} , P_{cr1} , P_{cr2} 를 가지고 PID 제어기의 파라미터 K_{p1} , K_{p2} , T_{i1} , T_{i2} , T_{d1} , T_{d2} 를 식 (4.24), 식 (4.25)와 같이 결정할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 K_{p1} &= 0.6K_{cr1} = 7.4775 \\
 T_{i1} &= 0.5P_{cr1} = 1.81 \\
 T_{d1} &= 0.125P_{cr1} = 0.4525
 \end{aligned}
 \tag{4.24}$$

$$\begin{aligned}
 K_{p2} &= 0.6K_{cr2} = 9.5853 \\
 T_{i2} &= 0.5P_{cr2} = 1.945 \\
 T_{d2} &= 0.125P_{cr2} = 0.48625
 \end{aligned}
 \tag{4.25}$$

4.2.2 RCGA를 이용한 PID제어기

앞에서 구한 Z-N 이득값을 바탕으로 RCGA를 이용하여 PID제어기 파라미터를 탐색한다.

RCGA의 제어 변수는 각각 집단의 크기 $N = 20$, 재생산 계수 $\eta = 1.8$, 교배 확률 $P_c = 0.9$, 돌연변이 확률 $P_m = 0.2$ 를 사용하였으며, PID제어기 파라미터의 상한 경계값 K_p^{UL} , K_i^{UL} , K_d^{UL} 은 Table 4.2에 나타난 Z-N의 파라미터 값을 참조하고, 모두 10으로 통일하였다.

목적함수는 세 가지 경우로 하여 제어기 파라미터를 탐색하였다. Fig. 4.14는 ISE를 목적함수로 하고, Fig. 4.15은 IAE를 목적함수로 하였으며, Fig. 4.16는 ITAE를 목적함수로 하여 제어기 파라미터를 탐색하는 과정을 나타낸 것이다.

Table 4.2은 Z-N의 동조법과 RCGA에 기초한 PID제어기의 이득값을 나타낸다.

Table. 4.2 Gains of PID Controllers by Z-N and GA

		K_{p1}	K_{p2}	K_{i1}	K_{i2}	K_{d1}	K_{d2}
Z-N		7.4775	9.5853	4.1312	4.9282	3.3836	4.6609
RCGA	ISE	9.9965	9.9975	7.2111	5.5845	6.5967	8.6660
	IAE	9.8510	9.9352	7.4551	6.9430	9.3725	7.9893
	ITAE	9.9947	9.9902	5.7334	4.2226	5.4039	6.9348

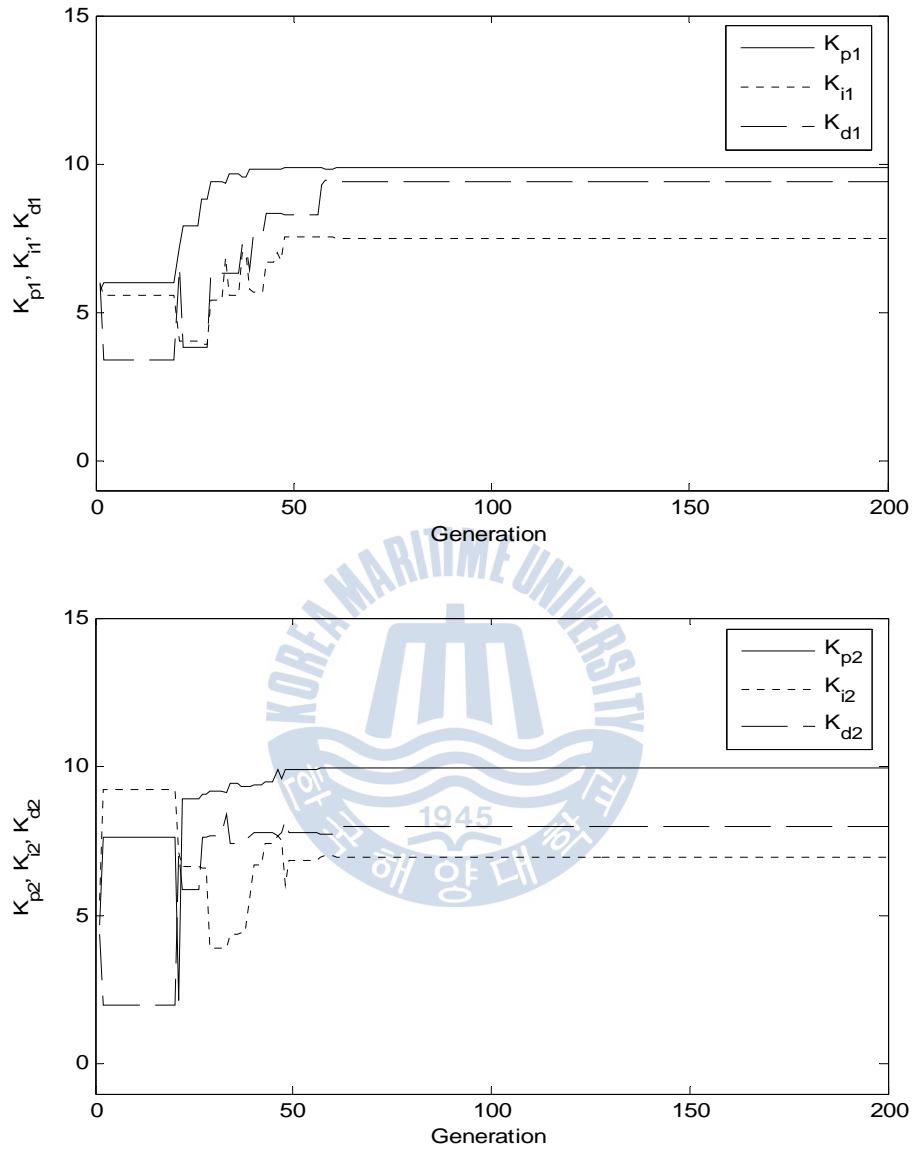


Fig. 4.14 Parameter estimation of TITO system using RCGA(Obj.: ISE)

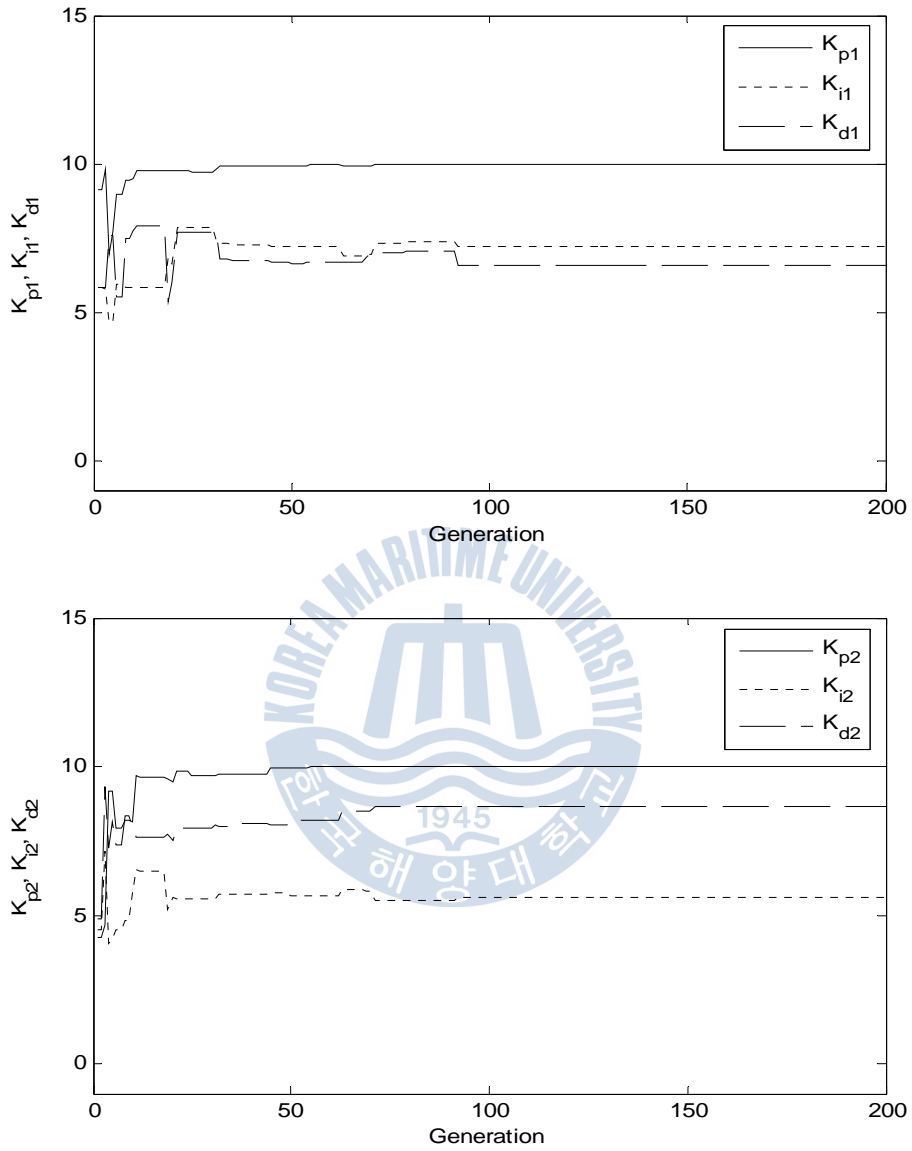


Fig. 4.15 Parameter estimation of TITO system using RCGA(Obj.: IAE)

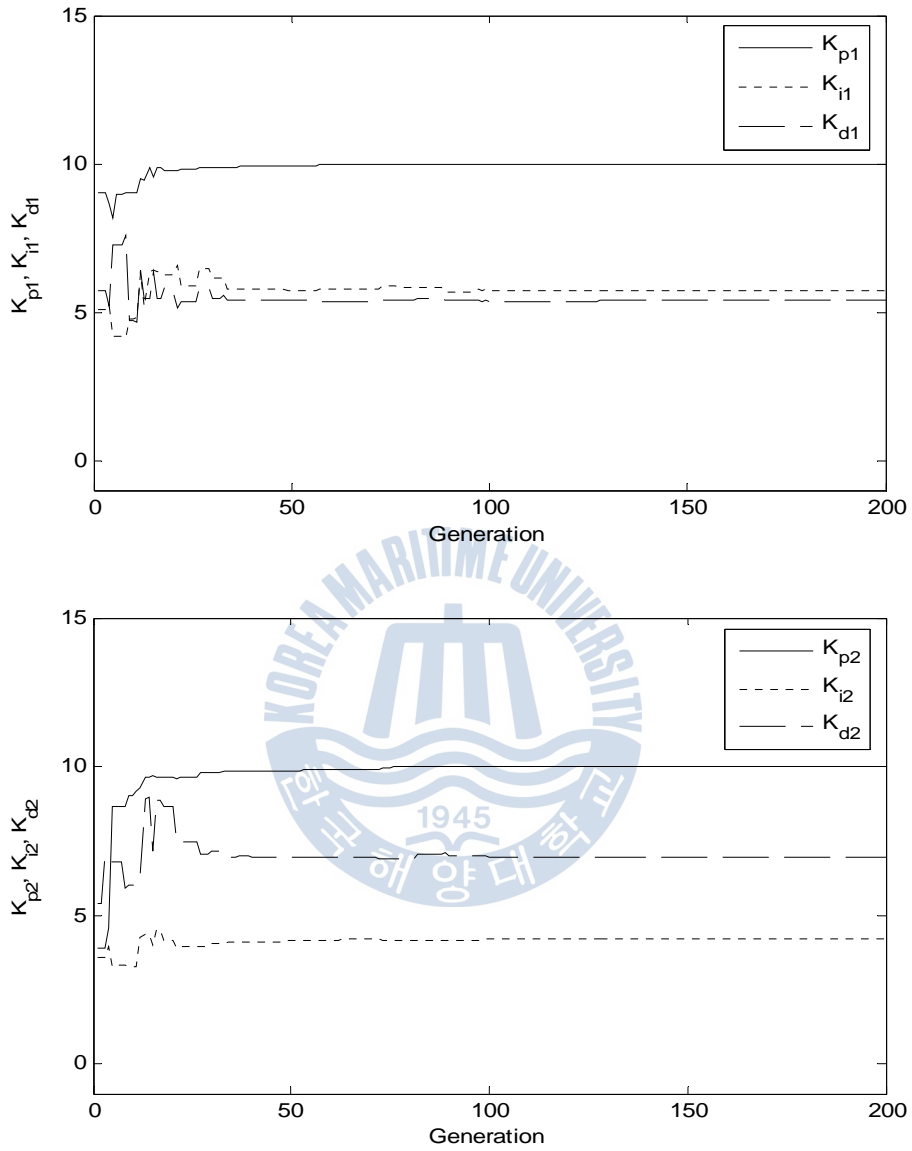


Fig. 4.16 Parameter estimation of TITO system using RCGA(Obj.: ITAE)

4.2.3 응답 특성

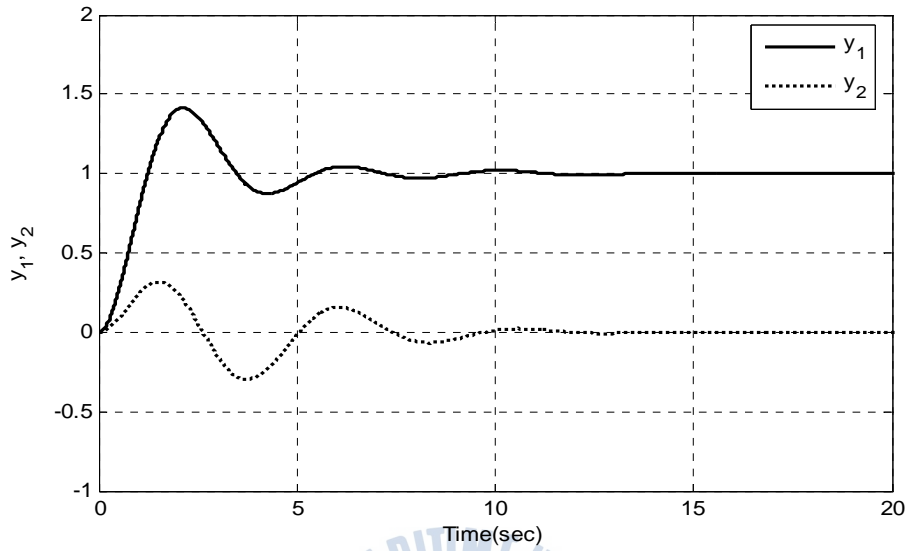
각각의 제어기에 입력 $r(t) = [1 \ 0]^T$ 를 주고, 출력 $y(t) = [y_1(t) \ y_2(t)]^T$ 와 제어입력 $u(t) = [u_1(t) \ u_2(t)]^T$ 을 확인하였다.

Fig. 4.17은 Z-N의 동조법으로 구한 PID제어기의 이득으로 시뮬레이션 한 경우이고, Fig. 4.18부터 Fig. 4.20까지는 각각 RCGA로 구한 PID제어기의 이득으로 시뮬레이션 한 경우이다. 이때 Fig. 4.18은 목적함수로 ISE를 사용한 경우이고, Fig. 4.19은 IAE를, Fig. 4.20은 ITAE를 목적함수로 사용한 결과이다.

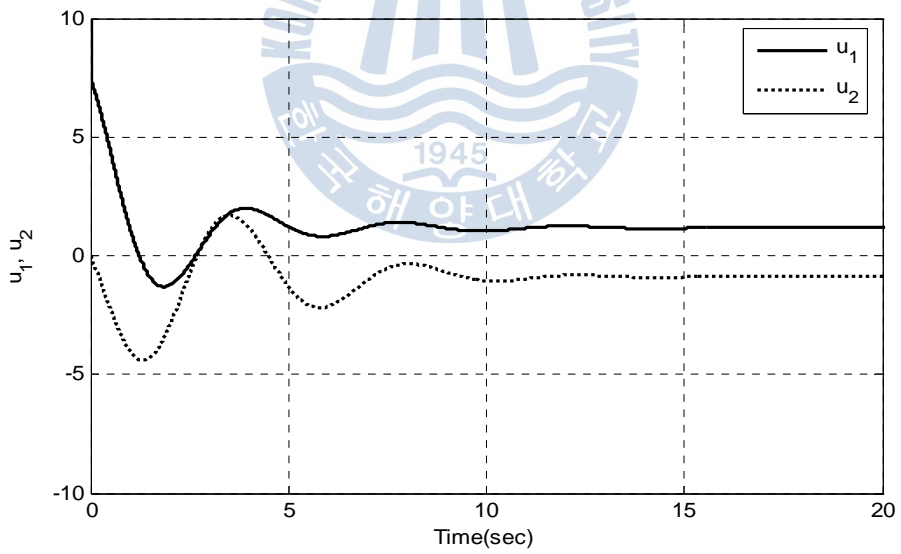
우선 Fig. 4.17과 Fig. 4.18을 비교해 보면, Z-N의 동조법은 약 11초 지점에서 $y_1(t)$ 의 값은 1로 안정되고, $y_2(t)$ 의 값은 0으로 안정된다. 그러나 RCGA에 의한 제어는 대략 7초 내외에서 $y_1(t)$ 은 1로 $y_2(t)$ 는 0으로 수렴하여 안정되므로 Z-N의 동조법보다 약 4초가량 빠르게 안정되는 것을 볼 수 있다.

RCGA로 탐색된 제어기의 응답특성을 목적함수에 따라 자세히 비교해 보면, ISE의 경우 Fig. 4.18과 같이 -8에서 7.5 사이의 세 가지 방법 중에서 가장 큰 폭의 제어입력을 요구 한다. $y_1(t)$ 의 경우 1로 안정하는데 9초로 세 가지 중에서 안정하는데 가장 느리다. IAE의 경우 Fig. 4.19와 같이 $y_1(t)$ 은 약 2초에서 1.4의 오버슈트가 발생하고 7초 정도에서 1로 수렴하여 세 가지 방법 중에서 가장 빠른 시간에 안정한다. $y_2(t)$ 는 1.5초 정도에서 0.3의 오버슈트가 있으며 6초 정도에서 0으로 수렴한다. ITAE의 경우 Fig. 4.20와 같이 -5에서 9 사이의 제어입력이 들어가고 이는 세 가지 목적함수 중에 가장 작은 제어입력을 요구한다. $y_1(t)$ 은 약 2초에서 1.4의 오버슈트가 발생하고 근소한 차이지만 세 가지 방법 중에서 가장 큰 오버슈트를 발생하며, 이는 $y_2(t)$ 의 경우에도 마찬가지로 근소한 차이지만 가장 큰 오버슈트를 발생하고 있다.

Fig. 4.21는 세 목적함수 값에 따른 출력 $y_1(t)$, $y_2(t)$ 의 값을 비교한 그래프이다.

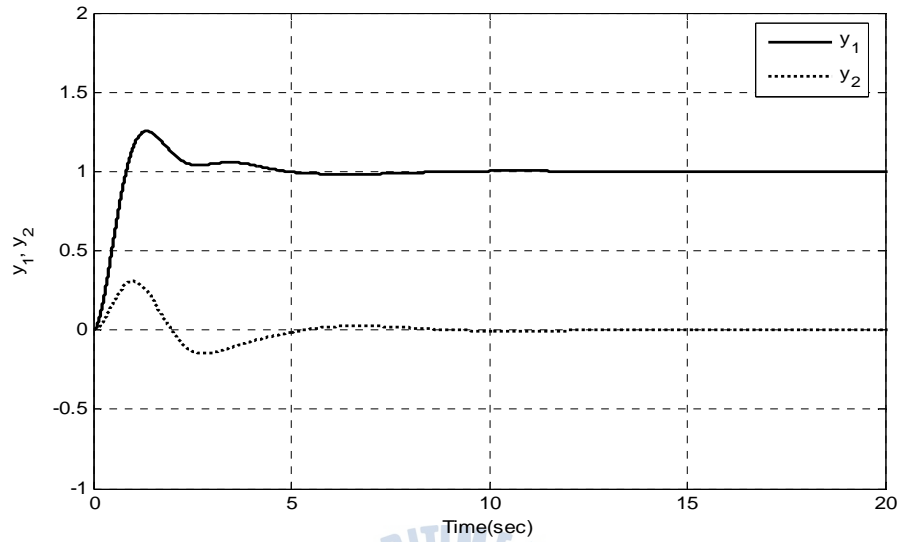


(a) Outputs of TITO systems : $y_1(t)$, $y_2(t)$

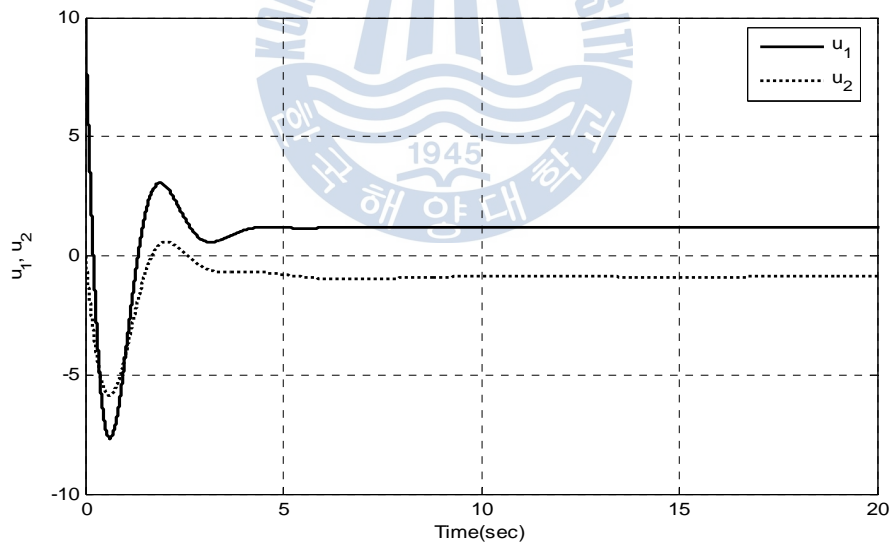


(b) Control inputs : $u_1(t)$, $u_2(t)$

Fig. 4.17 Responses of PID controllers by Z-N

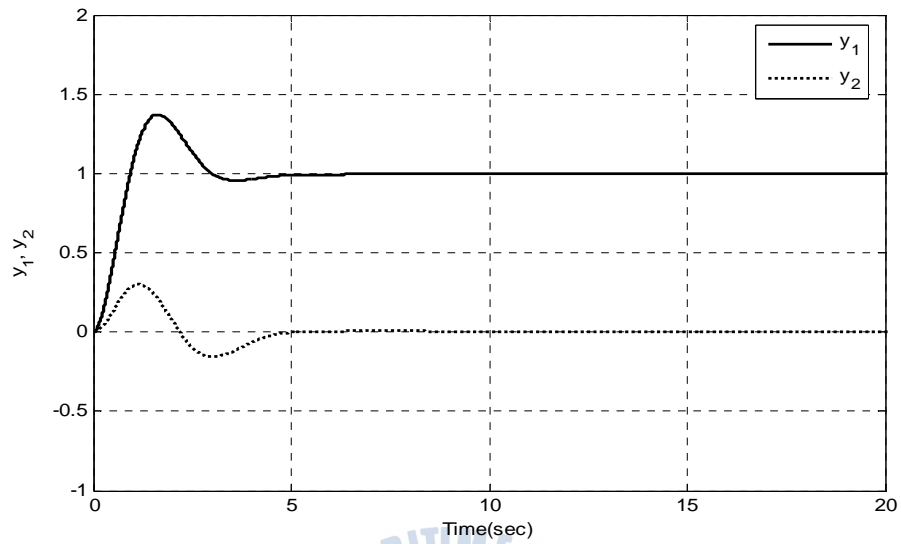


(a) Outputs of TITO systems : $y_1(t)$, $y_2(t)$

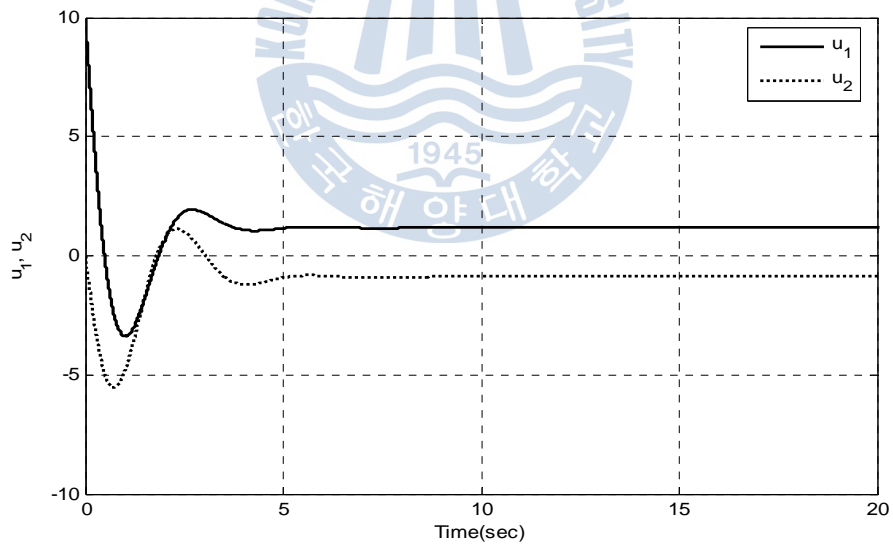


(b) Control inputs : $u_1(t)$, $u_2(t)$

Fig. 4.18 Responses of PID controllers using parameter of RCGA
(Object function : ISE)

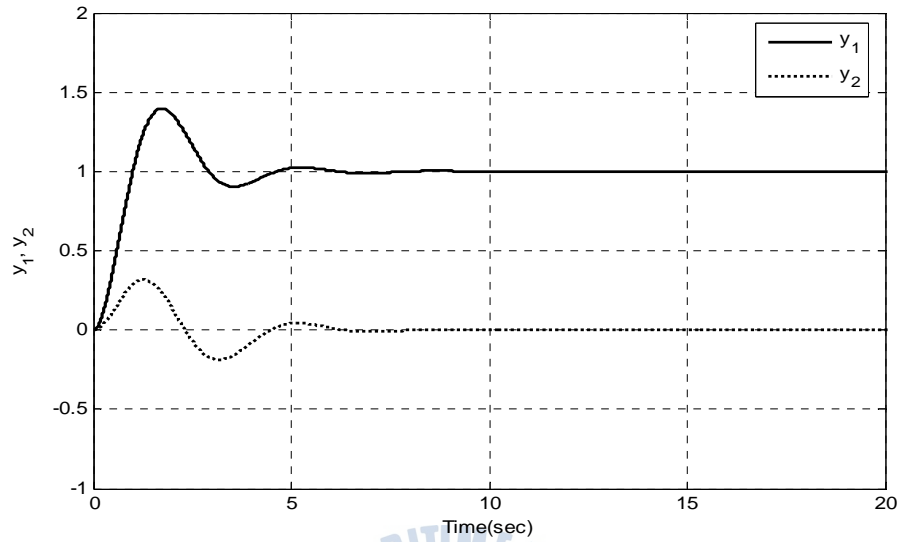


(a) Outputs of TITO systems : $y_1(t)$, $y_2(t)$

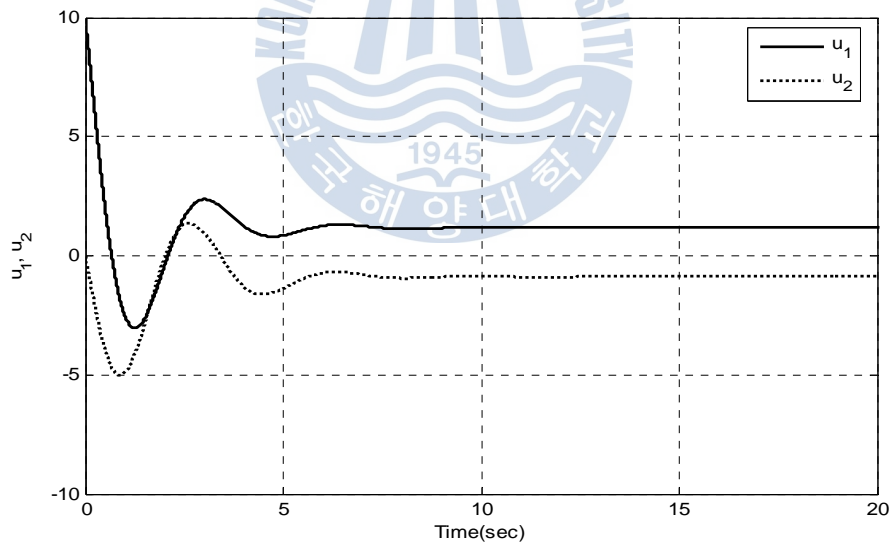


(b) Control inputs : $u_1(t)$, $u_2(t)$

Fig. 4.19 Responses of PID controllers using parameter of RCGA
(Object function : IAE)

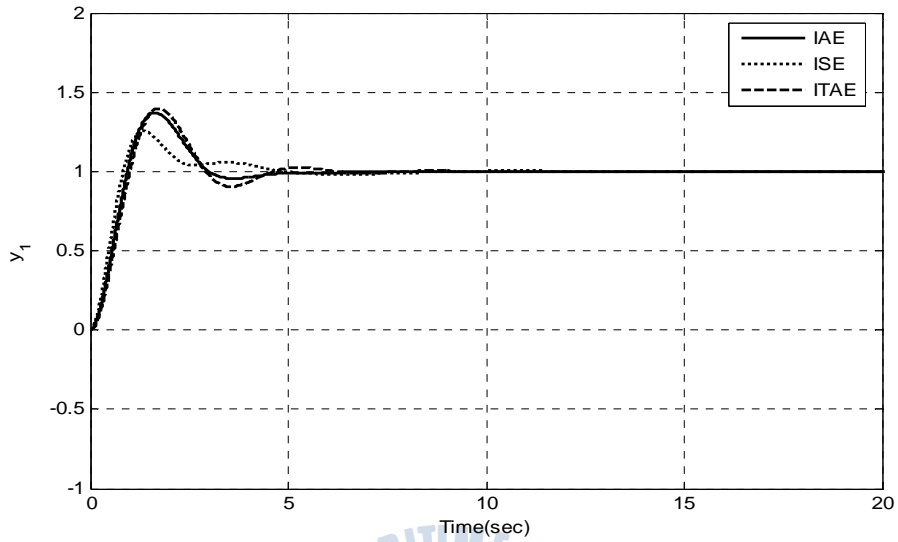


(a) Outputs of TITO systems : $y_1(t)$, $y_2(t)$

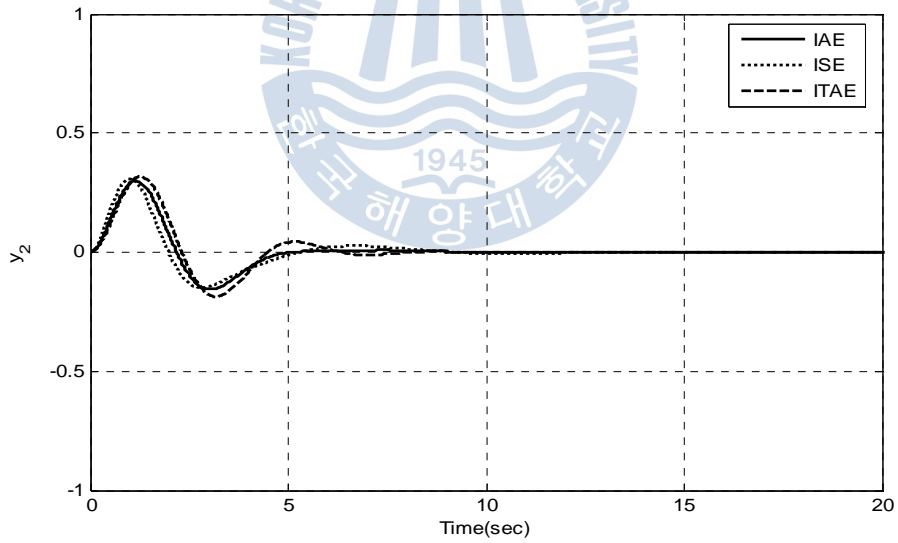


(b) Control inputs : $u_1(t)$, $u_2(t)$

Fig. 4.20 Responses of PID controllers using parameter of RCGA
(Object function : ITAE)



(a) Output : $y_1(t)$



(b) Output : $y_2(t)$

Fig. 4.21 Comparison of responses using RCGA

Fig. 4.22은 외란에 대한 제어성능을 알아보기 위해 20초에서 출력 $y_1(t)$ 에 -0.5 의 외란을 가해 주었을 때의 응답을 나타낸다. 이 때 PID제어기는 목적함수를 ISE로 설정한 이득값을 사용하였다. TITO 시스템은 두 개의 입·출력이 서로 상호 간섭을 일으키기 때문에 외란에 의해 변화된 제어입력 $u_1(t)$ 이 출력 $y_2(t)$ 에도 영향을 미치지만 외란이 발생했을 때에도 빠른 시간 내에 출력 $y_1(t)$, $y_2(t)$ 가 안정되는 것을 볼 수 있다.

이제 위의 제어기에 목표치를 변경했을 때의 제어 성능을 확인하기 위하여 13초마다 기준입력 $r_1(t)$ 을 각각 1, 0, -1 로 수정했다. Fig 4.11에서 출력 $y_1(t)$ 는 변경한 목표치에 수렴하여 빠르게 안정되는 것을 볼 수 있으며, 외란을 적용했을 때와 마찬가지로 목표치를 수정할 때마다 출력 $y_2(t)$ 가 영향을 받는 것을 볼 수 있다.



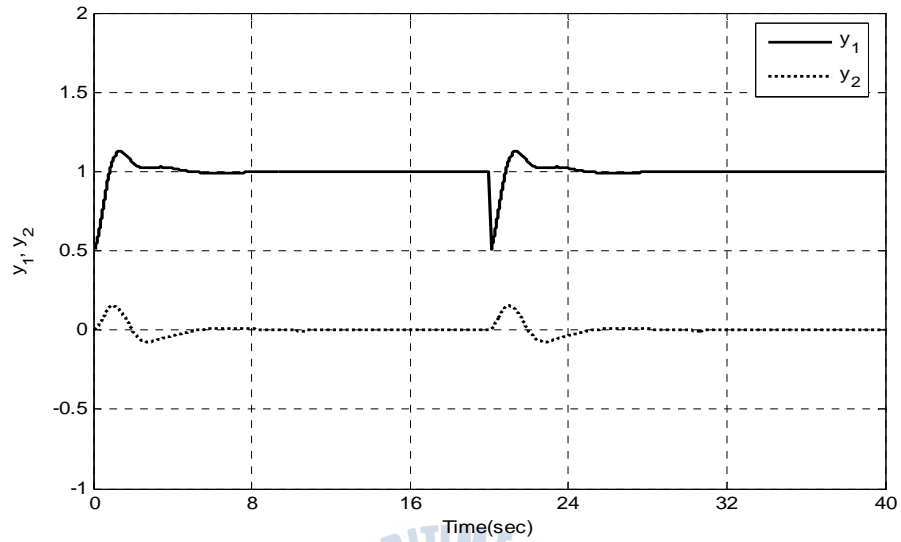


Fig. 4.22 Responses of PID controllers using RCGA for disturbance

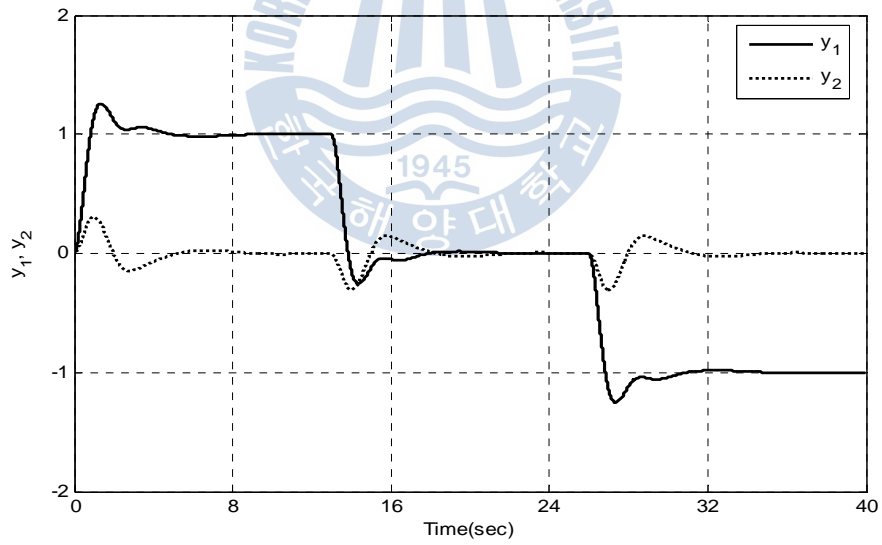


Fig. 4.11 Responses of PID controllers using RCGA for variable set-points

제 5 장 결 론

일반적으로 다변수 시스템은 산업 현장에서 두 개 이상의 변수를 제어해야 하는 경우로, 이들 대부분은 상호간의 출력이 서로 간섭을 일으키는 매우 복잡한 시스템이다.

대표적인 예로 공정제어(process control)에서 압력과 유량을 동시에 제어하는 경우나, 증류탑의 상하 온도를 함께 제어하는 경우 등이 있으며 이와 비슷한 예는 실제 산업 현장에서 쉽게 찾아 볼 수 있다.

본 논문에서는 이러한 다변수 시스템 중에서 TITO 시스템에 대해 RCGA를 이용하여 PID제어기 파라미터를 최적으로 탐색하는 방법을 제안하였다.

이와 비교하기 위해서 PID제어기 설계의 대표적인 방법인 Z-N 동조법을 이용한 제어기도 설계하였으며, 이렇게 설계된 제어기 파라미터는 RCGA의 탐색범위를 결정하는데 참고하였다. 이를 통해 RCGA의 연산시간을 절약할 수 있을 뿐만 아니라 파라미터를 탐색하는 동안 전역해를 보장할 수 있다.

제안한 방법의 유효성을 검증하기 위해서 Z-N의 동조법과 비교하여 시뮬레이션해본 결과, 일반적인 Z-N의 동조법은 비교적 높은 오버슈트를 보일 뿐만 아니라 상대적으로 안정되는데 오랜 시간이 걸렸으나, RCGA를 이용하여 설계한 PID제어기는 정상상태 도달시간, 오버슈트 등의 제어성능 지수에서 Z-N의 동조법보다 우수함을 확인할 수 있었다.

또한 RCGA로 파라미터를 탐색할 때 세 가지 목적함수 ISE, IAE, ITAE를 사용하여 PID제어기를 설계한 후 그 응답 특성을 비교해본 결과, 목적함수에 따라 그 응답 특성이 각각 차이가 있어 시스템과 제어환경에 따라 유용하게 적용될 수 있을 것으로 생각된다.

향후 n-입력, n-출력 시스템과 지연시간을 갖는 다변수 시스템으로 확장하는 연구가 필요할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] A. Niederlinski, "A heuristic approach to the design of linear multivariable interacting control system", *Automatica*, pp. 609-701, 1971.
- [2] S. Skogestad and M. Morari, "Robust performance of decentralized control systems by independent designs," *Automatica*, Vol. 25, No.1, pp. 119-125, 1989.
- [3] M. Chiu and Y. Arkun, "A methodology for sequential design of robust decentralized control systems", *Automatica*, Vol. 28, No.5, pp. 997-1001, 1992.
- [4] M. Hovd and S. Skogestad, "Sequential design of decentralized controllers", *Automatica*, Vol. 30, pp. 1601-1607, 1994.
- [5] E. Gagnon, A. Pomerleau, and A. Desbiens, "Mu-Synthesis of robust decentralized PI controllers", *IEEE Proc. Contr. Theory Appl.*, Vol. 146, No.4, pp. 289-294, 1999.
- [6] 이동배, 서병설, "TITO 시스템의 최적 PID제어기 동조", *대한전자공학회 하계종합학술대회 제26권 제1호*, pp. 2493-2496, 2003.
- [7] J. H. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, University of Michigan Press, Ann Arbor, MI, 1975.
- [8] D. E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley, 1989.
- [9] M. Gen, R. Cheng, *Genetic Algorithms and Engineering Design*, A Wiley- Interscience Publication, 1997.
- [10] 진강규, *유전알고리즘과 그 응용*, 교우사, 2002.
- [11] 진강규, 주상래, "실수코딩 유전알고리즘에 관한 연구", *제어·자동화·시스템공학 논문지*, Vol. 6, No. 4, pp. 268-275, 2000.
- [12] D. T. Pham and G. Jin "Genetic Algorithm using Gradient-like Reproduction Operator", *Electronics Letters*, Vol. 31, No. 18, pp. 1558-1559, 1995

- [13] K. A. De Jong, "An Analysis of the Behavior of a Class Genetic Adaptive Systems", Doctoral Dissertation, The University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, 1975.
- [14] K. Ogata, *Modern control engineering*, Prentice Hall, 1999.
- [15] 김도웅, "PID제어기의 모델기반 동조규칙", 한국박용기관학회 춘계학술대회 pp. 261-266, 2002.
- [16] M. Zhuang and D. Atherton, "PID controller design for a TITO system", IEE, Proc. Cont. Theory Appl., Vol. 141, No. 2, pp 111-120, 1994

