

공학석사 학위논문

제약조건을 고려한 불안정 시스템의
RCGA 기반 PID 제어

RCGA-based PID Control of Unstable Processes Concerned
with the Constraints



2013년 2월

한국해양대학교 대학원

메카트로닉스공학과 양아영

本 論 文 을 梁 雅 英 의 工 學 碩 士 學 位 論 文 으 로 認 准 함.

위원장 공학박사 오진석 인

위원 공학박사 유희한 인

위원 공학박사 소명옥 인

2012년 12월 17일

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 유전 알고리즘	3
2.1 유전알고리즘의 특징	3
2.2 유전알고리즘의 기본 구조	3
2.3 유전알고리즘 제약조건 취급	12
제 3 장 불안정 시스템의 PID 제어 설계	15
3.1 불안정 시스템	15
3.2 PID 제어기	16
3.2.1 De Paor와 O'Malley 방법	17
3.2.2 Venkatashanker와 Chikambaram 방법	18
3.2.3 Ho와 Xu 방법	18
3.2.4 Wen과 Yingqin 방법	19
3.3 제약조건을 고려한 RCGA PID 제어기 동조법	20
제 4 장 시뮬레이션	23
4.1 예제 시스템 I	23
4.1.1 추종제어	23
4.1.2 외란억제	31
4.2 예제 시스템 II	35

4.2.1 추종제어	35
4.2.2 외란억제	43
제 5 장 결론	47
참고문헌	48
감사의 글	51



RCGA-based PID Control of Unstable Processes Concerned with the Constraints

A-young, Yang

*Department of Mechatronics, Graduate School
Korea Maritime University*

Abstract

The Proportional Integral Derivative(PID) controller is still widely used in the process industries even though control theory has developed significantly since it was 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.

However, it is not easy to apply for unstable process with time delay. The reason is because of instability due to the poles existing on right-hand side in s-plane and the effect of time delay. Also, we can ascertain through many of the earlier researches that unstable processes with time delay have large overshoot the cause of system characteristics. The well known tuning methods for unstable process are De Paor and O'Malley method, Venkatasankar and Chikambaram method, Poulin and Pomerleau method, Ho and Xu method, Wen and Yingqin method. But the above methods did not consider the control environment.

This paper considers design technique for PID controller in case of predefining overshoot or settling time by designer according to control

environment. To deal with constraint problem like this, the RCGA(Real-Coded Genetic Algorithm) incorporating the penalty strategy is used this is the method that if the RCGA violates given constraints, the defined penalty function is summed to the evaluating function depending on the severity and to convert non-constraints optimization problem. The proposed method is applied to the unstable FOPTD(First Order Plus Time Delay) system and simulation is given to illustrate the set-point tracking performance.



Nomenclature

a_{ij}	i th row and j th column element of matrix \mathbf{A}
\mathbf{e}	error state vector
$f(s(k))$	fitness function
$f_b(k)$	fitness of the best
$F(x(k))$	objective function
N	population size
k	k th generation
$\mathbf{P}(k)$	population at k th generation
$\tilde{\mathbf{P}}(k)$	population after crossover at k th generation
$\bar{\mathbf{P}}(k)$	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
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
t_f	final integral time

$\hat{\mathbf{x}}$	augmented state vector
y	system output
y_r	reference input
z	error state variable
γ	constant
η_i	parameter of the reproduction operator
λ	multiplier
τ	random number of 0 or 1
Λ_m	gain margin
ϕ_m	phase margin
$P(K)$	penalty function
w_1, w_2	penalty pressure
$J_1(K), J_2(K), J_3(K)$	object function
ψ	PID parameter



제 1 장 서 론

1.1 연구 배경

우리 주변에는 많은 프로세스들이 존재하며 이를 제어하기 위한 많은 제어 방법들이 연구되고 있다. 산업현장에서 많이 볼 수 있는 프로세스들은 안정한 개회로 시스템(Open loop system)이며, 2차 이상의 고차 시스템이 많다. 이러한 시스템은 적절한 방법으로 시간지연을 갖는 1차 시스템(First Order Plus Time Delay ; FOPTD)으로 근사화가 가능하며, 근사화된 시스템을 기반으로 PID 제어기의 설계가 가능하다.

PID제어기 설계기법으로는 Z-N(Ziegler-Nichols)의 페루프 동조법, 개루프 동조법, Cohen-Coon(C-C) 동조법, IMC 동조법, Lopez ITAE 등의 방법들이 있으며, 이러한 제어기법은 안정한 FOPTD 시스템에 대해서 쉽게 적용 가능하다.

반면, 시스템의 극점이 복소평면의 우반부에 존재하는 불안정한 시스템은 위의 방법을 적용하기 어렵다. 또한 시간지연이 함께 존재하는 경우에는 시스템의 불안정성과 결합되어 제어가 더욱 까다롭게 된다.

이러한 불안정한 시스템의 PID 제어에 관한 대표적인 연구는 Z-N방법을 개선한 것으로 최적 이득여유와 최적 위상여유를 기반으로 하는 De Paor와 O'Malley의 방법 [1], De Paor와 O'Malley의 수치 해석적 방법 대신 근사적 해석법을 이용해 P 제어기와 PI 제어기를 동조한 Venkatasankar와 Chikambaram 방법[2], 특정한 이득여유와 위상여유를 만족하도록 하는 PI 제어기를 제안한 Ho와 Xu 방법[3], 루프-쉐이핑(Loop-shaping)제어에 기초하여 PID 제어기를 동조하는 Wen과 Yingqin의 방법[4] 등이 있다. 또한 실수코딩 유전알고리즘(Real-coded genetic algorithm : RCGA)을 이용하여 PID 제어기를 체계적으로 설계하는 방법도 있다.

이와 같이 기존에 제시된 방법들은 복잡한 수치 해석적 방법이 필요하거나 오버슈트가 크게 발생하거나 혹은 정착시간이 길어지는 단점이 있다.

한편, 실제 제어환경을 고려하면 설계자는 오버슈트, 상승시간, 정착시간 등의 제약조건을 고려해야 하는데, 기존의 방법들은 이러한 제약조건을 만족하는 것이 어렵다.

따라서 이러한 단점을 해결하기 위하여 본 논문에서는 벌점전략이 결합된 RCGA를 사용하여 불안정한 시스템의 PID 제어기 동조 방법을 제안하고자 한다. 제안한 방법은 최적해 탐색도구인 RCGA에 벌점전략을 결합하여 설계자가 원하는 제약조건을 만족하지 못하는 해(solution)에 대해서 벌점을 부과하여, 제약조건을 만족하는 해를 탐색하

도록 하는 것이다. 이때 사용하는 목적함수는 절대오차적분(IAE), 제곱오차적분(ISE), 시간곱제곱오차적분(ITAE)의 3가지를 고려한다.

1.2 연구 내용 및 구성

앞에서 설명한 기존의 불안정 시스템을 제어하는 방법들은 불안정한 시스템을 안정하게 제어하는데 초점을 맞춰서 연구되었다. 이와 같은 방법은 제어환경에서 주어지는 제약조건을 고려하지 못한다.

따라서 본 연구에서는 설계자가 제어환경에 따라 주어지는 제약조건을 고려하기 위하여 벌점전략이 결합된 RCGA 기반의 PID 제어기 동조방법을 제안하고자 한다. 제어환경에 대한 제약조건은 여러 가지가 있겠지만 본 논문에서는 오버슈트와 상승시간을 제약조건으로 고려하기로 한다. 이처럼 제약조건을 고려하면 제약성 최적화 문제가 되고, 이는 매우 까다로운 최적화 문제이다. 이를 해결하기 위해서 벌점전략을 RCGA에 결합하여 비제약성 최적화 문제로 변환시킨다.

그러면 RCGA가 PID 제어기 파라미터를 찾는 과정에서 집단내의 잠정적인 해들이 제약조건을 위반(부적합한 영역을 탐색)하면 그 위반 정도에 따라 목적함수에 설계자가 설정한 벌점을 부가하도록 하여 제약조건을 만족시키는 해를 탐색하도록 한다.

제안하는 방법을 불안정한 시스템에 적용하여 시뮬레이션을 실시하고, 기존의 방법과 비교하여 그 유효성을 확인하도록 한다.

이와 같은 내용으로 본 논문은 총 5장으로 구성되어 있으며, 각 장의 내용은 다음과 같다.

제2장은 제안한 방법의 PID 제어기를 최적으로 동조하기 위해 사용한 RCGA의 개요와 제약조건을 취급하는 방법에 대해 설명한다. 제3장에서는 불안정 시스템의 특성 및 기존의 연구 방법을 간단히 소개하며, 본 논문에서 제안하는 벌점전략이 결합된 RCGA를 사용하여 PID 제어기를 최적으로 동조하는 방법을 설명한다. 제4장에서는 제2장과 제3장에서 설명한 내용을 기초로 하여 기존의 연구들에서 자주 사용되는 불안정 시스템에 적용하고, 시뮬레이션을 실시하여 제안한 제어 기법의 유효성을 입증한다.

마지막으로 제5장에서는 본 논문에서 얻어진 최종적인 결론을 요약하고 정리한다.

제 2 장 최적 이득 탐색을 위한 GA이론

2.1 유전알고리즘의 특징

유전알고리즘(genetic algorithm)은 Holland[5]에 의해 1975년 처음으로 개발된 유전학과 자연환경에서 발견되는 자연선택(natural selection) 원리를 알고리즘 형태로 구현하여 컴퓨터 알고리즘으로 모방한 최적화 기법이다[6,7]. 유전알고리즘은 두 부모 유전자로부터 그들 자손의 유전자를 형성하는 유성생식과 자연환경에서 일어나는 진화 원리를 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 이득함수 또는 목적함수 값만을 필요로 하고, 연속성, 미분가능성과 같은 다양한 형태의 탐색공간으로부터 자유롭고, 목적함수 외의 탐색공간에 대한 사전지식을 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, 돌연변이가 연산을 통해 집단이 변경되며, 다시 개체의 적합도가 평가되는 연산을 반복함으로써 집단 내 개체들을 최적해 쪽으로 진화해가도록 한다.

Fig. 2.1은 유전알고리즘의 대략적인 구조를 나타낸다.

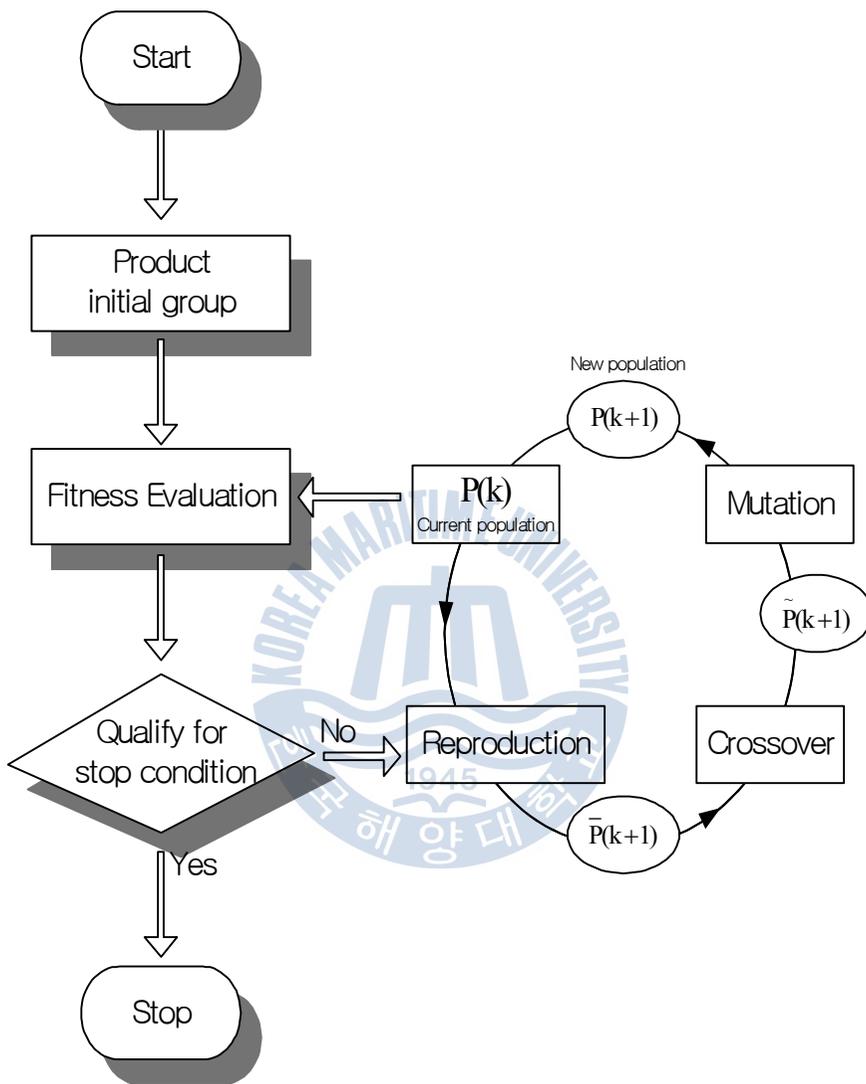


Fig. 2.1 Operation of a genetic algorithm

- 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)가 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.

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

여기서 $x_i \in \mathbb{R}$ 은 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.[8]

- 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)는 식 (2.2)와 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.

- 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 적합도 함수는 최대화 문제 형태로 표현되어야 하고, 음의 값을 갖지 않아야 한다. 따라서 최대화 문제는 식 (2.3a)와 같이 최소화 문제는 식 (2.3b)와 같은 사상(mapping)을 통해 얻을 수 있다.

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

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

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 $f(s) \geq 0$ 을 만족시키는 상수로서 유전알고리즘의 성능에 직접적인 영향을 주므로 적절한 선정이 필요하다[9].

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.

- 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) [10]을 사용하였다. 이는 기존에 많이 알려진 루울렛휠 재생산 방법이 초기 세대에서 초우량 개체가 출현하면 이를 여러 번 복제하여 집단의 유전적 다양성을 감소시키고 확률적으로 최적 개체를 반드시 선택 못하는 단점을 극복한 방법이다. 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.

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

$$\begin{aligned} f_b(k) &= \max [f_i(k)] \\ & \quad 1 \leq i \leq N \end{aligned} \quad (> 0) \quad (2.4b)$$

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.

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

여기서 $x_{ij}(k+1)$ 은 재생산 후 i 번째 염색체의 j 번째 요소이고 $x_{ij}(k)$ 와 $x_{bj}(k)$ 는 $\mathbf{x}_i(k)$ 와 $\mathbf{x}_b(k)$ 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 $\mathbf{s}_i(k+1) = (x_{i1}(k+1) \ x_{i2}(k+1) \ \cdots \ x_{in}(k+1))$ 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)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.

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

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

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 유전자 마다 독립적으로 결정될 수 있는 0과 1사이의 난수이다.

Fig. 2.2는 이 연산자의 연산 결과를 보여준다.

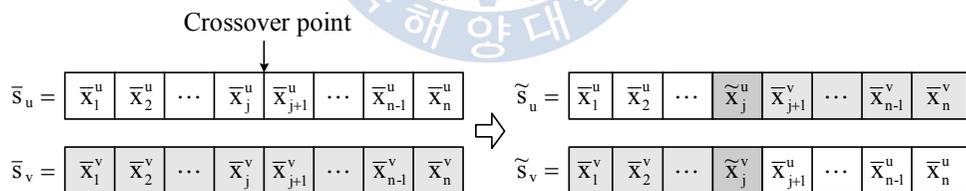


Fig. 2.2 Modified simple crossover

▪ 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. 돌연변이 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.

$$\tilde{s} = \begin{bmatrix} \tilde{x}_1 & \tilde{x}_2 & \dots & \tilde{x}_j & \tilde{x}_{j+1} & \dots & \tilde{x}_{n-1} & \tilde{x}_n \end{bmatrix} \Rightarrow s = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_j & x_{j+1} & \dots & x_{n-1} & x_n \end{bmatrix}$$

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.

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

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

- 전략

적합도 평가를 위해 선정하는 γ 는 초기에 잘 선정해도 진화 도중에 값이 고정되면 선

택압(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 것으로서 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[11].

- 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.

2.3 유전알고리즘의 제약조건 취급

복잡한 최적화 문제에 유전알고리즘을 적용할 때 고려되어야 할 사항 중 하나는 제약조건을 어떻게 다룰 것인가 하는 것이다. 왜냐하면 주어진 문제에는 제약조건이 수반될 수 있고 또한 유전 연산자들이 염색체를 다루면서 부적합한 해를 생산할 수 있기 때문이다. 기존의 문헌에는 제약조건을 다루는 몇 가지 방법들이 제시되어 왔다.[12] 이들은 크게 거부전략, 복구전략, 유전 연산자의 보완 전략, 별점전략으로 구분되며 이와 관련된 내용은 참고문헌[13,14,15]을 중심으로 요약해서 소개한다.

- 거부전략

거부전략(rejecting strategy)은 진화도중에 부적합한 염색체가 발생되면 이를 모두 버리는 방법을 말한다. 이 전략은 적합한 탐색공간이 블록이면서 전체 탐색공간의 상당한 부분을 차지하는 경우에는 잘 동작한다. 그러나 다음 이유로 사용에 있어서 제한적일 수밖에 없다. 첫째, 만약 초기 집단 내의 염색체가 모두 부적합할 경우에는 이들을 모두 제거해버림으로써 해를 개선할 여지가 없게 된다. 둘째, 흔히 적합한 해의 탐색공간이 블록이 아닌 경우에는 부적합한 영역을 경유하면 더 쉽게 최적점에 도달할 수 있는데, 이 전략에서는 부합한 해가 해를 찾는데 전혀 기여를 하지 못한다는 것이다.

- 복구전략

복구전략(repairing strategy)은 해독기(decoder)나 복구 알고리즘(repairing algorithm)을 이용하여 부적합한 염색체를 적합하게 수정하는 방법을 말한다. 이 전략

은 부적합한 개체의 출현을 미리 막도록 특별한 표현 사상의 사용을 통해 적합한 해의 생성 확률을 증가시키거나, 부적합한 해를 복구 알고리즘으로 복구해준다. 조합형 최적화 문제에서 복구과정을 만드는 것은 쉽다. 그러나 이 방법의 단점은 흔히 계산이 많다는 것[16]과 문제에 따라 적용방법이 달라진다는 것이다. 즉, 문제에 맞는 특별한 복구 알고리즘이 필요하다.

염색체의 복구는 적합도 평가에만 사용하든지 아니면 원래의 염색체를 교체하는 두 가지 방법 중 하나로 수행되어질 수 있다. 전자는 염색체의 복구는 적합도 계산에만 사용하고 부적합한 염색체를 집단 내에 그대로 두는 방법이고, 후자는 복구된 염색체를 집단 내 부적합한 염색체와 교체하는 방법이다. Nakano와 Yamada 는 항상 교체하는 방법[17]을 택한 반면에, Liepins 등은 전혀 교체하지 않는 방법[18]을 연구하였다. Orvosh와 Davis 는 소위 5% 교체를 제안하였는데[19], 여러 조합최적화 문제에 적용한 결과 복구된 염색체의 5%로 부적합한 해를 대체 했을 때 최선의 결과를 준다고 보고하고 있다.

- 유전 연산자의 보완 전략

유전 연산자의 보완 전략(modifying genetic operator strategy)은 염색체들의 적합성이 항상 유지되도록 문제에 따라 적절한 데이터 구조와 여기에 적합한 유전 연산자를 고안해서 사용하는 것이다. 여러 방법들은 그 유용성을 증명해 주고 있다.[20,21]

그러나 이 방법으로 효율적인 데이터 구조를 개발하는 것이 항상 가능한 것이 아니고, 이 데이터 구조들은 특별한 연산자를 필요로 한다.

- 벌점전략

흔히 제약조건을 가지는 최적화 문제들의 해공간은 적합한 영역과 부적합한 영역으로 구성되기 때문에 만약 알고리즘이 부적합한 영역을 탐색하게 될 때 벌점을 부과하고 이 벌점을 평가함수 계산에 반영하면 제약조건이 따르는 최적화 문제를 제약조건이 없는 문제로 변환할 수 있다. 현재까지의 문헌에는 여러 가지 벌점전략을 찾아볼 수 있다.[22,23,24,25,26] 대부분의 벌점 전략(penalizing strategy)은 주어진 문제에 따라 그 형태가 다르고 또한 다른 파라미터 설정을 요구한다. 이들은 그 형태에 따라 여러 가지로 분류하는 것이 가능하나 고정 벌점전략과 가변 벌점전략으로 구분하는 것도 그 중의 하나이다. 고정 벌점전략은 벌점강도(penalty pressure)를 항상 일정하게 유

지하는 방법이고, 가변 벌점전략은 제약조건을 위반한 정도에 따라서 또는 세대 진행에 따라서 벌점강도를 변경시키는 방법을 말한다.

본 논문에서는 고정벌점전략을 사용하여 제약조건을 고려한 제어를 설계하였다.



제 3 장 불안정 시스템의 PID 제어 설계

불안정 시스템에는 크게 적분 시스템(Integrated system)과 불안정 시스템(Unstable system)의 2가지로 구분할 수 있는데, 원점에 극점을 갖는 시스템을 적분 프로세스라고 하고, 극점의 실수부가 양수인 시스템을 불안정 프로세스라 한다.

본 장에서는 불안정 시스템의 특성 및 PID 제어 방법, 기존에 연구되었던 4가지의 대표적인 불안정 시스템 제어 방법에 대해 나열하며, 설계자가 고려한 제약조건을 만족시키는 PID 제어를 벌점 전략을 포함한 RCGA를 이용하여 설계한다.

3.1 불안정 시스템

불안정 프로세스는 적분 프로세스와 더불어 제어시스템 설계가 까다로운 시스템이다. 이는 주파수 영역의 오른쪽 영역에 극점이 존재하고, 경우에 따라서는 시간지연이 포함되어 있기 때문이다.

본 논문에서 다루는 불안정한 시스템은 기존의 문헌에서 주로 볼 수 있는 식 (3.1)과 같은 형태이다.

$$G_p(s) = \frac{K}{T_s - 1} e^{-Ls} \quad (3.1)$$

여기서 K , T , L 은 각각 시스템의 이득, 시정수, 시간지연을 의미한다.

예를 들어 위의 식 (3.1)의 값이 $K=1$, $T=1$, $L=0.4$ 인 시스템의 단위계단 응답은 Fig. 3.1과 같이 발산한다.

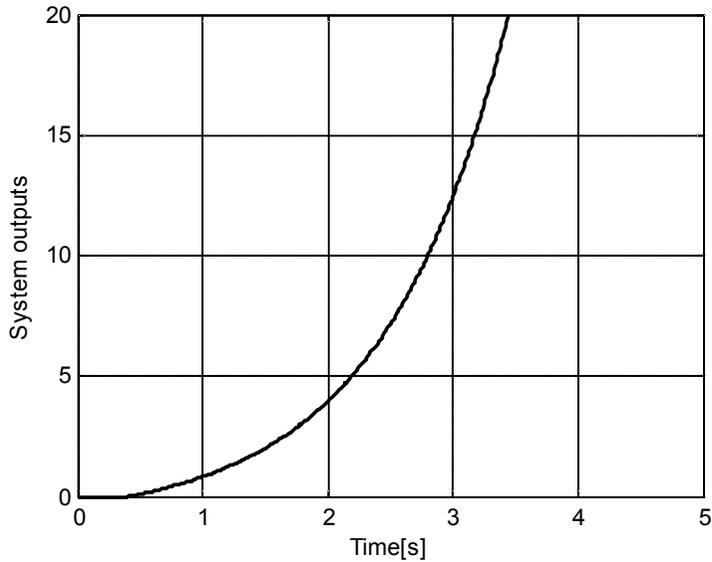


Fig. 3.1 Step response of an unstable process

3.2 PID 제어기

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. 산업현장의 고차 시스템들은 대부분 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 Fig. 3.2와 같다.

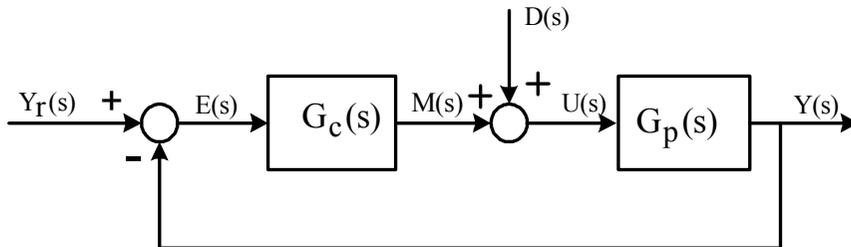


Fig. 3.2 Block diagram of a PID control system

Fig. 3.2의 $Y_r(s)$, $Y(s)$, $D(s)$ 는 각각 시스템의 목표치, 출력, 외란을 나타내고 $E(s)$, $M(s)$, $U(s)$ 는 각각 오차, 제어기 출력, 제어대상의 입력신호를 나타낸다.

제어대상의 전달함수 $G_p(s)$, PID 제어기의 전달함수 $G_c(s)$ 는 식 (3.2)와 식 (3.3)과 같이 나타낼 수 있으며, K , T , L 은 제어대상의 정상이득, 시정수, 시간지연을 K_p , T_i , T_d 는 PID 제어기의 비례이득(Proportional gain), 적분시간(Integral time), 미분시간(Derivative time)을 의미 한다.

$$G_p(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{Ts - 1} e^{-Ls} \quad (3.2)$$

$$G_c(s) = \frac{M(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (3.3)$$

대부분의 PID 제어는 안정한 시스템에 적용하기 때문에 식 (3.2)의 제어대상의 전달함수 $G_p(s)$ 의 분모는 $Ts + 1$ 로 표기하는 것이 보편적이나, 본 논문에서는 불안정 시스템을 중점적으로 다루기 때문에 불안정 시스템의 전달함수로 표기하였다.

현재 안정화된 PID 제어방법으로 많이 쓰이는 Z-N 동조법 외에도 Cohen-Coon 동조법, IMC 동조법, Lopez ITAE 동조법 등 기존의 방법들이 많이 있다.

한편, 불안정 프로세스의 제어에 관한 연구는 안정한 시스템보다는 연구가 적기는 하나 기존에 발표된 방법들이 있다. 그 중 대표적인 몇 가지 연구를 연구시기에 따라 확인해보도록 한다.

3.2.1 De Paor와 O'Malley 방법

본 방법은 De Paor와 O'Malley[1]가 Z-N방법을 개선한 것으로 최적 이득여유와 최적 위상여유를 기반으로 하는 P 제어기와 PI 제어기를 설계하는 것이다. 그러나 이 방법은 이득 및 위상여유를 계산하는데 복잡한 수치 해석적 방법이 필요하고, PI 제어기에 대한 안정조건이 증명되지 않은 단점이 있다. 제어기 파라미터는 식 (3.4)와 같다

$$K_p = \frac{\cos(\sqrt{\epsilon(1-\epsilon)}) + \sqrt{\frac{(1-\epsilon)}{\epsilon}} \sin(\sqrt{\epsilon(1-\epsilon)})}{K} \quad (3.4a)$$

$$T_i = \frac{T \sqrt{\frac{\epsilon}{(1-\epsilon)}}}{\tan\left(\frac{1}{2}\left(\tan^{-1} \sqrt{\frac{1-\epsilon}{\epsilon}}\right) - \sqrt{\epsilon(1-\epsilon)}\right)} \quad (3.4b)$$

$$T_d = \frac{\epsilon}{T(1-\epsilon)} \mu \quad (3.4c)$$

여기서 $\epsilon = \frac{L}{T}$ 이고, $\mu = \sqrt{(1-\epsilon)/\epsilon} \tan\left(\frac{\phi_m}{2}\right)$, $\phi_m = \tan^{-1} \sqrt{\frac{1-\epsilon}{\epsilon}} - \sqrt{\epsilon(1-\epsilon)}$ 이다.

3.2.2 Venkatasankar와 Chikambaram 방법

Venkatasankar와 Chidambaram[2]은 De Paor와 O'Malley에서 필요한 수치 해석적 방법 대신 근사적 해법을 이용해 P 제어기와 PI 제어기를 제안하였다. 관련 제어기 파라미터는 식 (3.5)와 같다.

$$K_p = \sqrt{K_{\min} K_{\max}} \quad (3.5a)$$

$$T_i = 25T(1-\epsilon) \quad (3.5b)$$

여기서 $\epsilon = \frac{L}{T}$ 이고, $K_{\min} = 0.98 \sqrt{1+T^2 \omega_c^2}$, $K_{\max} = 5\alpha \sqrt{(1+\alpha^2 T^2 \omega_c^2)/(1+25\alpha^2)}$

$\omega_c = 0.2/(T(1-\epsilon))$ 이다. $\alpha = 5\beta(1-\epsilon)/\epsilon$, $\beta = \begin{cases} 1.373, & 0 < \epsilon < 0.25 \\ 0.953, & 0.25 < \epsilon < 0.775 \end{cases}$ 이다.

3.2.3 Ho와 Xu 방법

Ho와 Xu[3]는 특정한 이득여유와 위상여유를 만족하도록 하는 PI 제어기를 제안하였으며, 폐루프 시스템이 나이퀴스트(Nyquist) 안정도 조건을 만족시킴을 보여주었다.

$$K_p = \frac{\omega_p T}{A_m K} \quad (3.6a)$$

$$T_i = \frac{1}{\left(\frac{\pi}{2}\omega_p - \omega_p^2 L - \frac{1}{T}\right)} \quad (3.6b)$$

여기서 $\omega_p = \frac{A_m \phi_m + \frac{\pi}{2} A_m (A_m - 1)}{(A_m^2 - 1)L}$ 이다. 사용자가 PI 제어기의 파라미터를 얻기 위해서는 이득여유(A_m)와 위상여유(ϕ_m)를 선정해야하는데, 이득 및 위상여유는 식 (3.7)과 같이 계산된다.

$$A_m = \frac{\pi T}{4K_p KL} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{16L}{\pi^2 T_i} - \frac{16L}{\pi^2 T}}\right) \quad (3.7a)$$

$$\phi_m = \frac{\pi}{2} - \frac{KK_p L}{T} - \frac{1}{K_p KL} \left(1 + \frac{T}{T_i}\right) \quad (3.7b)$$

한편, A_m 과 ϕ_m 의 결정을 위한 가이드라인(guide line)을 다음과 같이 제시하고 있다.

- A_m 의 선정 범위 : $0.7A_{\phi_{max}} \sim 1.3A_{\phi_{max}}$
- ϕ_m 의 선정 범위 : $0.5\phi_{max} \sim 0.9\phi_{max}$

이때, ϕ_{max} 와 $A_{\phi_{max}}$ 는 식 (3.8)과 같다.

$$\phi_{max} = \frac{\pi}{2} - 2\sqrt{L/T} \quad (3.8a)$$

$$A_{\phi_{max}} = \frac{2\sqrt{L/T}}{\pi/2 - \sqrt{\pi^2/4 - 4L/T}} \quad (3.8b)$$

3.2.4 Wen과 Yingqin 방법

Wen과 Yingqin[4]은 루프-쉐이핑(Loop-shaping) H_∞ 제어에 기초하여 PID 제어기를 제안하였다.

$$K_p = \frac{1}{K(a_1\epsilon + a_2)} \quad (3.9a)$$

$$K_i = \frac{1}{KT(b_1\epsilon + b_2)} \quad (3.9b)$$

$$K_d = \frac{T(c_1\epsilon + c_2)}{K} \quad (3.9c)$$

여기서 $\epsilon = \frac{L}{T}$, λ 는 사용자 정의 파라미터이고, 각 계수들은 다음과 같다.

$$a_1 = -\frac{0.0373}{\lambda} + 0.1862$$

$$a_2 = -0.1498\log\lambda + 0.6508$$

$$b_1 = \frac{10.5045}{\lambda} + 0.8032$$

$$b_2 = \frac{3.2312}{\lambda} - 0.3445$$

$$c_1 = 0.9065\lambda^{0.1632}$$

$$c_2 = -\frac{1}{0.2075\lambda + 2.0335}$$



3.3 제약조건을 고려한 RCGA PID 제어기 동조법

RCGA를 이용하여 설계자가 원하는 제어성능을 보장하기 위하여 제어기의 세 파라미터는 주어진 제어대상의 동특성을 고려한다. PID 제어기는 설정치 추종성능을 개선하거나 또는 외란 억제성능을 개선하기 위해서 사용될 수 있기 때문에 대부분의 연구에서는 이 두 가지 성능을 모두 고려한다.

PID 제어기의 세 가지 파라미터 K_p , T_i , T_d 는 RCGA의 염색체(Chromosome)가 된다. 여기서 집단 내 염색체들의 성능이 좋고 나쁨은 적합도 평가를 통해 계량되는데, 그 적합도는 성능지수(목적함수)로부터 계산되어진다. 제어환경에 따라 적절히 선택해서 사용할 수 있는 여러 가지의 성능지수가 있으나, 본 논문에서는 절대오차적분(IAE), 제곱오차적분(ISE), 시간곱제곱오차적분(ITAE)의 3가지 성능지수로 사용하도록 하며, 성능지수는 식

(3.10)과 같다. 최적의 PID 계수는 어떤 성능지수를 선택하느냐에 따라 그 값이 다르게 된다.

$$\text{IAE} : J_1(K) = \int_0^{t_f} |e(K, t)| dt \quad (3.10a)$$

$$\text{ISE} : J_2(K) = \int_0^{t_f} e^2(K, t) dt \quad (3.10b)$$

$$\text{ITAE} : J_3(K) = \int_0^{t_f} t |e(K, t)| dt \quad (3.10c)$$

여기서 $\psi = [K_p, T_i, T_d]^T \in \mathbf{R}^3$ 는 PID 제어기 파라미터로 구성되는 벡터이고, e 는 설정치와 출력 간의 오차이며, t_f 는 이후의 적분값이 무시될 수 있도록 충분히 큰 시간이다.

위의 내용을 기초로 하여 제약조건을 고려하면 다음과 같다.

여기서 고려할 제약조건을 불안정 시스템의 가장 큰 특징으로 나타나는 오버슈트와 정착시간으로 두 가지 값을 선정하였다. 제약사항의 내용을 식으로 나타내면 식 (3.11)과 같다. 여기서 오버슈트는 수치상으로 비교하기 쉽도록 최대 백분율 오버슈트(M_p)로 나타내었다. 여기서 c_1 과 c_2 는 설계자가 제어환경을 고려하여 선정하는 상수이다.

$$\begin{aligned} M_p(K) &\leq c_1 [\%] \\ t_s(K) &\leq c_2 [\text{sec}] \end{aligned} \quad (3.11)$$

위의 조건을 RCGA에 포함하기 위해 사용한 방법으로 여러 가지 제약조건을 고려하는 내용 중 벌점 전략을 채택하였다. 이는 RCGA가 PID 제어기 파라미터를 찾는 과정에서 집단내의 잠정적인 해들이 제약조건을 위반(부적합한 영역을 탐색)하면 그 위반 정도에 따라 목적함수에 설계자가 설정한 벌점을 부가하도록 하는 방법이다. 벌점함수 $P(K)$ 가 결합된 RCGA의 목적함수는 다음과 같다.

$$F(K) = J(K) + P(K) \quad (3.12)$$

단,

$$P(K) = \begin{cases} 0; & K \text{가 적합한 해일 경우} \\ w_1(c_1 - M_p(K))^2 + w_2(c_2 - t_s(K))^2; & K \text{가 부적합한 해일 경우} \end{cases}$$

여기서 w_1, w_2 는 각 제약조건에 대응되는 벌점상수로서 설계자에 의해 도입되는 변수이고, 목적함수 $J_i(K)$ 는 제어환경에 따라 적절히 선택해서 사용할 수 있도록 여러 가지 성능지수를 고려하며, 짐작할 수 있듯이 최적의 PID 계수는 어떤 목적함수를 선택하느냐에 따라 그 값이 달라진다. 식 (3.10)의 목적함수 중에서 ISE는 해석이 용이하여 최적제어기 설계 등에 자주 이용되거나 오차가 클 때는 큰 벌점을, 작을 때는 작은 벌점을 주게 되어 최적해 부근에서 계수의 변화에 둔감하다. IAE는 오차의 절대크기를 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.[12]

이렇게 함으로써 제약성 최적화 문제는 식 (3.12)의 목적함수 $F(K)$ 를 최소로 하는 비제약성 최적화 문제로 변환된다. Fig. 3.3은 지금까지 설명한 과정을 블록선도로 나타낸 것이다.

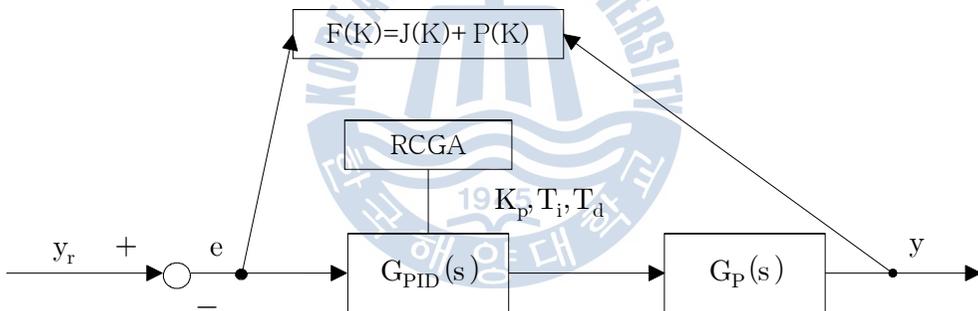


Fig 3.3 Optimization of a constrained PID control system using the RCGA

제 4 장 시뮬레이션

제2장에서는 불안정 시스템의 PID제어기 파라미터를 탐색하기 위한 도구로 사용한 RCGA의 이론적 배경과 RCGA에 제약조건을 취급하기 위한 방법에 대해 설명하였다. 제3장에서는 불안정 시스템의 특성과 기존의 연구 기법을 소개하였고, 본 논문에서 제안하는 별점전략이 결합된 RCGA 기반의 PID 제어기 파라미터 동조법을 설명하였다.

따라서 본 장에서는 여러 연구에서 인용되는 불안정한 시스템에 PID 제어기를 설계하여 시뮬레이션을 실시하고, 기존 방법과 비교하여 제안한 방법의 유효성을 검증한다.

4.1 예제 시스템 I

예제 시스템 I은 시스템의 이득이 1, 시정수가 1, 시간지연이 0.2초인 시스템으로 비교적 시간지연이 작은 시스템이다.

예제 I의 시뮬레이션에서 사용된 시스템은 여러 연구에서 인용되는 대표적인 불안정 FOPTD 시스템이며, 전달함수는 식 (4.1)과 같다.

$$G_1(s) = \frac{1}{s-1} e^{-0.2s} \quad (4.1)$$

4.1.1 추종제어

앞서 3장에서 소개한 대표적인 4가지 불안정 시스템 제어방법의 PI 또는 PID 제어기의 파라미터 K_p , T_i , T_d 를 구하면 Table 4.1과 같다.

Table 4.1 PID parameters of unstable process for set-point tracking

PID Parameters Methods	K_p	T_i	T_d	비고
De Paor and O'Malley	1.699	1.354	0.184	
Venkatashankar and Chikambaram	2.647	20.0	-	$\beta = 1.373$
Ho and Xu	2.929	1.436	-	$A_m = 0.7A_{\phi_m}$ $\phi_m = 0.6\phi_{m\max}$
Wen and Yingqin	2.792	1.141	0.001	$\lambda = 9$

Table 4.1에 따른 PID 제어의 파라미터를 이용한 단위계단 응답은 Fig. 4.1, Fig. 4.2와 같다.

Fig. 4.1은 De Paor와 O'Malley의 방법과 Venkatashankar와 Chikambaram의 방법을 비교한 그래프이다. 불안정 시스템에서 특징으로 나타나는 큰 오버슈트와 함께 시스템이 안정되기까지는 De Paor와 O'Malley의 방법은 20초 정도에 시간이 걸리며, Venkatashankar와 Chikambaram의 방법에서는 30초가 지나도 안정되지 않는 모습을 보여준다.

Fig. 4.2는 Ho와 Xu의 방법과 Wen과 Yingqin의 방법을 비교한 그래프이다. 앞서 두 가지의 방법보다는 5초 이내에 제어가 되는 매우 빠른 정착시간을 보여주고 있으나, 여전히 100%에 가까운 큰 오버슈트를 보여준다.

Table 4.2는 위의 4가지 방법에 대한 최대 백분율 오버슈트(M_p), 피크시간(t_p), 상승시간(t_r), 정착시간(t_s)을 정리한 것이며, Fig. 4.1, Fig. 4.2와 Table 4.2를 확인한 결과 Venkatashankar와 Chikambaram의 방법을 제외한 3가지는 약 100%에 가까운 큰 오버슈트를 가지며, 최대 30초에 가까운 긴 정착시간을 가지고 있는 것으로 확인할 수 있다.



(b) Control inputs

Fig. 4.1 Step responses and control inputs of PID control system for unstable process by De Paor and O'Malley, Venkatasankar and Chikambaram

(a) Step responses



(b) Control inputs

Fig. 4.2 Step responses and control inputs of PID control system for unstable process by Ho and Xu, Wen and Yingqin

Table 4.2 Performances of PID controllers for set-point tracking

Performances Methods	$M_p(\%)$	t_p	t_r	t_s
	최대 백분율 오버슈트	피크시간	상승시간	정착시간
De Paor and O'Malley	105.45	1.99	0.44	14.14
Venkatashankar and Chikambaram	68.16	1.19	0.26	31.58
Ho and Xu	98.37	0.97	0.22	2.01
Wen and Yingqin	106.15	1.01	0.22	3.05

다음은 제약조건을 포함한 RCGA 기반의 PID 제어기를 설계한다. 제약조건은 최대 백분율오버슈트가 55% 이하, 2% 오차에 대한 정착시간이 2.5초 이내가 되도록 설정하였다. 따라서 식 (3.11)의 $c_1 = 55$, $c_2 = 2.5$ 가 되며, 식 (3.12)에서 별점 상수는 경험적으로 $w_1 = 10^{15}$, $w_2 = 10^4$ 으로 선정하였다.

적합성을 확인하기 위한 목적함수는 3가지 경우로 하여 제어기 파라미터를 탐색하였다. Fig. 4.3은 IAE를 목적함수로, Fig. 4.4은 ISE를 목적함수로, Fig. 4.5는 ITAE를 목적함수로 하여 제어기 파라미터를 탐색하는 과정을 나타낸 것이다. RCGA의 제어 변수는 각각 집단의 크기 $N = 20$, 재생산 계수 $\eta = 1.8$, 교배확률 $P_c = 0.9$, 돌연변이 확률 $P_m = 0.2$ 를 사용하였다. 이를 통해 탐색된 PID 제어기 파라미터는 Table 4.3과 같다.

Table 4.3 PID parameters for proposed method

PID Parameters Objective function	K_p	T_i	T_d
	IAE	5.0398	1.088
ISE	5.0344	1.098	0.131
ITAE	4.9167	1.011	0.132

Fig. 4.3 Searching process of parameters for PID(objective function : IAE)

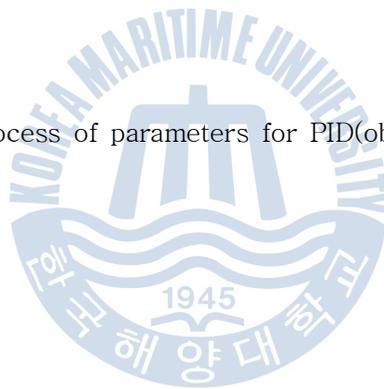


Fig. 4.4 Searching process of parameters for PID(objective function : ISE)

Fig. 4.5 Searching process of parameters for PID(objective function : ITAE)

Fig. 4.6은 3가지 성능지수에 벌점함수가 부가된 목적함수를 이용하여 RCGA를 통해 찾아낸 PID 제어기의 파라미터로 단위계단 입력을 가한 경우의 응답이다. 0.2초의 시간지연을 가지면서, 제약조건으로 주어진 $M_p \leq 55(\%)$ 와 $t_s \leq 2.5(s)$ 를 완벽하게 모두 만족하고 있다. 또한, 기존의 방법에 비해 큰 오버슈트를 많이 낮췄을 뿐만 아니라, 정착시간 2.5초 이내로 줄이고 있다. Table 4.4는 3가지 방법에 의한 최대 백분율 오버슈트(M_p), 피크시간(t_p), 상승시간(t_r), 정착시간(t_s)등의 성능을 각각 요약하여 나타낸 것이다.

Table 4.4 Performances for proposed method

Objective function	Performances	$M_p(\%)$	t_p	t_r	t_s
	최대백분율 오버슈트	피크시간	상승시간	정착시간	
IAE	55	0.53	0.13	2.32	
ISE	55	0.54	0.13	2.34	
ITAE	55	0.54	0.14	2.27	

(a) Step responses



(b) Control inputs

Fig. 4.6 Step responses and control inputs of PID control system for unstable process by RCGA for unstable process with constraints

4.1.2 외란억제

예제 시스템 I에 대해 설계된 PID 제어기의 외란억제 성능을 확인하도록 한다. 외란은 설정치 $R = 0$ 인 상태에서 단위 계단형태의 외란 $D = 1 (T > 0)$ 이 인가되는 것으로 고려한다.

Table 4.5는 기존의 방법과 제안한 방법에 대한 응답을 정량적으로 비교하기 위하여 단위계단 외란이 투입될 때 교란된 응답의 첨두값(Perturbation peak) M_{pk} , 이 첨두값에 도달하는 데 걸리는 시간 t_{pk} , 교란된 응답이 설정치의 2% 내의 범위로 회복되는 시간 t_{ry} 를 나타낸 것이다.

Fig. 4.7은 De Paor와 O'Malley의 방법과 Venkatasankar와 Chikambaram의 방법을 비교한 것이고, Fig. 4.8은 Ho와 Xu의 방법 및 Wen과 Yingqin의 방법을 비교한 것이다. Fig. 4.9는 제안한 방법에 의한 응답을 나타낸 것이다.

Table 4.5 Performances of PID controllers for disturbance rejection

Performances Methods	M_{pk} 첨두값	t_{pk} 피크시간	t_{ry} 회복시간
De Paor and O'Malley	0.665	1.401	>15
Venkatasankar and Chikambaram	0.615	1.135	>15
Ho and Xu	0.512	0.835	1.961
Wen and Yingqin	0.519	0.845	2.940
Proposed method(IAE)	0.260	0.500	1.880
Proposed method(ISE)	0.260	0.500	2.040
Proposed method(ITAE)	0.262	0.500	1.790

(a) Disturbance responses



(b) Control inputs

Fig. 4.7 Disturbance responses and control inputs of PID control system for unstable process by De Paor and O'Malley, Venkatasankar and Chikambaram

(a) Disturbance responses



(b) Control inputs

Fig. 4.8 Disturbance responses and control inputs of PID control system for unstable process by Ho and Xu, Wen and Yingqin

(a) Disturbance responses



(b) Control inputs

Fig. 4.9 Disturbance responses and control inputs of PID control system for unstable process by RCGA with constraints

4.2 예제 시스템 II

예제 시스템 II는 시스템의 이득이 1, 시정수가 2, 시간지연을 1.2초 가지는 시스템으로 비교적 시간지연이 큰 시스템이다.

위의 예제시스템 I과 같은 방법으로 기존의 방법과 RCGA의 방법을 비교하며, RCGA의 제약조건을 적용한 PID 제어기를 설계 그 유효성을 값과 그래프로 확인한다. 예제 시스템 II의 전달함수는 식 (4.3)과 같다.

$$G_2(s) = \frac{1}{2s - 1} e^{-1.2s} \quad (4.3)$$

4.2.1 추종제어

기존의 방법으로 불안정 시스템에 대한 제어방법의 PI 또는 PID 제어기의 파라미터 K_p , K_i , K_d 를 구하면 Table 4.8과 같다.

Table 4.8 PID parameters of unstable process for set-point tracking

Performances Methods	K_p	T_i	T_d	비고
De Paor and O'Malley	1.2666	25.066	0.0598	
Venkatashankar and Chikambaram	1.4326	20.0	-	$\beta = 0.953$
Ho and Xu	1.3645	233.99	-	$A_m = 0.7A_{\phi_m}$ $\phi_m = 0.6\phi_{max}$
Wen and Yingqin	2.320	5.554	0.445	$\lambda = 9$

Fig. 4.10, Fig. 4.11은 Table 4.8에 따른 PID 제어기의 파라미터를 이용한 단위계단 응답이다. Fig. 4.10에서는 특히 De Paor와 O'Malley의 방법의 경우 약 400%에 가까운 기존방법들 중에 가장 큰 오버슈트를 보여주며, 두 가지 방법 모두 정착시간이 50초에 가까운 예제 I보다도 더욱 불안정한 응답을 나타내었다. 또한 예제 I에서는 정착시간이 다

른 제어방법보다 탁월했던 Ho와 Xu방법과 Wen과 Yingqin방법은 정착시간 50초를 지나서도 안정되지 않는 더 긴 정착시간을 보여주었다.

Table 4.9는 예제 I 과 동일한 방법으로 최대 백분율 오버슈트(M_p), 피크시간(t_p), 상승시간(t_r), 정착시간(t_s)을 정리한 내용이다.

Table 4.9 Performances of PID controllers for set-point tracking

Performances Methods	M_p (%)	t_p	t_r	t_s
	최대 백분율 오버슈트	피크시간	상승시간	정착시간
De Paor and O'Malley	399.380	7.1	0.91	49.21
Venkatashankar and Chikambaram	367.700	5.88	0.82	50
Ho and Xu	376.700	6.74	0.87	50
Wen and Yingqin	232.470	3.44	0.54	29.1



(a) Step responses



(b) Control inputs

Fig. 4.10 Step responses and control inputs of PID control system for unstable process by De Paor and O'Malley, Venkatasankar and Chikambaram

(a) Step responses



(b) Control inputs

Fig. 4.11 Step responses and control inputs of PID control system for unstable process by Ho and Xu, Wen and Yingqin

앞서 Table 4.9를 통해 확인한 바와 같이 이번 시스템은 매우 큰 오버슈트 및 정착시간을 보여준다. 이번 시스템에서는 제약조건을 최대 백분율 오버슈트가 130% 이하 ($c_1 = 130$)로 발생하면서 2% 정착시간이 20초 이내($c_2 = 20$)가 되도록 설정 하였다. 제약 조건에서 사용되는 벌점전략의 벌점 상수는 경험적으로 $w_1 = 10^{15}$, $w_2 = 10^4$ 으로 선정하였다. 벌점전략을 결합한 RCGA를 통해 탐색된 PID 제어기 파라미터는 Table 4.10과 같다.

Table 4.10 PID parameters for proposed method

PID Parameters / Objection function	K_p	T_i	T_d
IAE	1.871	12.507	0.739
ISE	1.945	12.580	0.759
ITAE	1.893	12.369	0.746

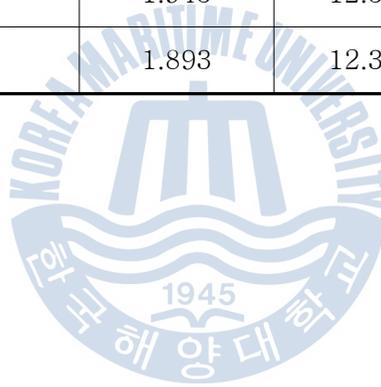


Fig. 4.12 Searching process of parameter for PID(objective function : IAE)

Fig. 4.13 Searching process of parameter for PID(objective function : ISE)

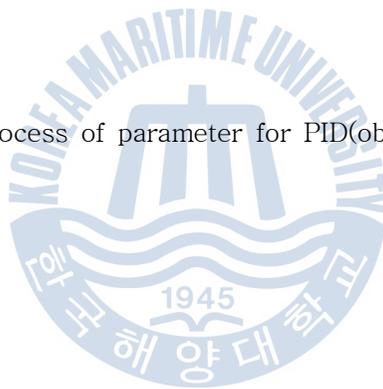


Fig. 4.14 Searching process of parameter for PID(objective function : ITAE)

Fig. 4.15는 제안한 방법을 이용해 최적으로 동조한 PID 제어기의 응답을 나타낸 것이고, Table 4.11은 제어성능을 나타낸 것이다. Fig 4.15와 Table 4.11을 통해 확인할 수 있듯이 제안한 방법은 주어진 제약조건인 $M_p \leq 130(\%)$ 와 $t_s \leq 20(s)$ 를 완벽하게 만족시키고 있음을 알 수 있다.

Table 4.11 Performances for proposed method

Performances Objection function	$M_p(\%)$	t_p	t_r	t_s
	최대 백분율 오버슈트	피크시간	상승시간	정착시간
IAE	130.000	3.36	0.66	17.34
ISE	130.000	3.28	0.64	17.75
ITAE	130.000	3.33	0.66	17.46



(a) Step responses



(b) Control inputs

Fig. 4.15 Step responses and control inputs of PID control system for unstable process by RCGA for unstable process with constraints

4.2.2 외란억제

예제 I 과 같이 제안한 시스템에 앞서 추종제어에서 확인했던 방법들의 외란 억제 성능을 확인하도록 한다. 기존의 외란억제 동조법을 제안하고 있지 않으므로 PI 및 PID 제어기의 파라미터는 Table 4.8과 동일하다. 앞의 내용과 동일한 방법으로 시스템에 대해 설정치 $R=0$ 인 상태에서 단위 계단 외란 $D=1 (T>0)$ 이 입력될 때의 응답을 그린 것이다.

Table 4.12은 기존의 방법과 제안한 방법을 각 방법의 응답을 단위계단 외란이 투입될 때 교란된 응답의 첨두값(Perturbation peak) M_{pk} , 이 첨두값에 도달하는 데 걸리는 시간을 t_{pk} , 교란된 응답이 설정치의 2% 내의 범위로 회복되는 시간을 t_{ry} 로 정의하고 계산하여 나타낸 것이다.

Fig. 4.16, Fig. 4.17은 기존의 방법에 단위 계단 외란이 입력될 때의 응답을 그린 내용이며, Fig. 4.18은 제약조건을 고려한 내용에 외란을 입력할 때의 응답을 나타내었다. Fig. 4.16 ~ Fig. 4.18, 그리고 Table 4.9을 통해 알 수 있듯이 RCGA로 최적 동조한 PID 제어기가 기존의 제어기 보다 양호한 외란억제 성능을 보이고 있다.

Table 4.12 Performances of PID controllers for disturbance rejection

Performances Methods	M_{pk}	t_{pk}	t_{ry}
	첨두값	피크시간	회복시간
De Paor and O'Malley	3.468	6.665	48
Venkatashankar and Chikambaram	2.883	5.600	>50
Ho and Xu	3.445	6.670	>50
Wen and Yingqin	1.169	3.280	24.050
Proposed method(IAE)	1.118	3.280	15.300
Proposed method(ISE)	1.080	3.200	17.420
Proposed method(ITAE)	1.118	3.280	15.310

(a) Disturbance responses



(b) Control inputs

Fig. 4.16 Disturbance responses and control inputs of PID control system for unstable process by De Paor and O'Malley, Venkatasankar and Chikambaram

(a) Disturbance responses



(b) Control inputs

Fig. 4.17 Disturbance responses and control inputs of PID control system for unstable process by Ho and Xu, Wen and Yingqin

(a) Disturbance responses



(b) Control inputs

Fig. 4.18 Disturbance responses and control inputs of PID control system for unstable process by RCGA with constraints

제 5 장 결 론

시스템의 극점이 복소평면의 우반부에 존재하는 불안정한 시스템의 제어는 쉽지 않다. 또한, 시간지연이 함께 존재하는 경우에는 시스템의 불안정성과 결합되어 제어가 더욱 까다롭게 된다. 이러한 불안정한 시스템에 대한 기존의 방법들은 복잡한 수치 해석적 방법이 필요하고, 안정화시키기 위해 제어를 해보면 오버슈트가 크게 발생하거나 혹은 정착시간이 길어지는 단점이 있다. 한편, 실제 제어환경을 고려하면 설계자는 오버슈트, 상승시간, 정착시간 등의 제약조건을 고려해야 하는데, 기존의 방법들은 이러한 제약조건을 만족하기 어렵다.

본 논문에서는 복소평면상의 우반부에 극점을 하나 포함하고, 동시에 시간지연을 갖는 시스템인 불안정 FOPTD 프로세스에 대한 PID 제어기 동조 기법을 제안하였다. 특히, 백분율 오버슈트 및 정착시간에 대한 제약조건이 있는 제약성 최적화 문제를 다루었으며, IAE, ISE 및 ITAE의 세 가지 성능지수에 별점전략이 고려된 목적함수를 이용하여 RCGA 방법에 의해 최적으로 PID 제어기의 파라미터를 동조하였다. 별점전략은 RCGA가 PID 제어기 파라미터를 탐색하는 과정에서 집단내의 잠정적인 해들이 제약조건을 위반하면 그 위반 정도에 따라 성능지수에 설계자가 설정한 별점을 부가하도록 하여 제약조건을 만족시키는 해를 탐색하는 방법이다.

불안정한 시스템을 제어하는 기존의 방법과 본 논문에서 제안하는 방법을 비교하기 위해서 네 가지 방법을 연구하고 두 가지 불안정한 시스템에 적용하여 시뮬레이션하였다. 시뮬레이션 방법으로 추종성능과 외란억제 성능을 확인하기 위해 단위계단 입력과 단위계단 외란을 가했다. 기존의 방법들은 대부분 오버슈트가 크고 정착시간이 길었지만 본 논문에 의한 방법은 제약조건인 오버슈트 및 정착시간의 범위 내에 들어 있음을 확인하였다. 시스템에 따라 강한 제약조건일 경우 제어가 불가능한 경우도 생긴다.

본 연구 결과를 실제 불안정한 장치에 적용하여 확인하지 못한 것은 향후의 연구 과제로서 지속적으로 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] A. M. De Paor, M. O'Malley, "Controllers of Ziegler-Nichols Type for Unstable Process with Time Delay", *Int. J. Control*, Vol. 49, No. 4, pp. 1273-1284, 1989
- [2] V. Venkatasankar, M. Chidambaram, "Design of P and PI Controllers for Unstable First-Order Plus Dead Time Delay Systems", *Int. J. Control*, Vol. 60, No. 1, pp. 137-144, 1994
- [3] W. K. Ho, W. Xu, "PID Tuning for Unstable Process Based on Gain and Phase Margin Specifications", *IEE Proc.-Cont. Theory Appl.*, Vol. 146, No. 5, pp. 415-425, 1998
- [4] T. Wen, Y. Yingqin and N. Yuguang, "Tuning of PID Controller for Unstable Process", *IEEE Proc.-International Conference on Control Applications*, pp. 121-124, 1999
- [5] J. H. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, University of Michigan Press, Ann Arbor, MI, 1975.
- [6] D. E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley, 1989.
- [7] M. Gen, R. Cheng, *Genetic Algorithms and Engineering Design*, A Wiley-Interscience Publication, 1997.
- [8] 진강규, 유전알고리즘과 그 응용, 교우사, 2002.
- [9] 진강규, 주상래, "실수코딩 유전알고리즘에 관한 연구", *제어·자동화·시스템공학 논문지*, Vol. 6, No. 4, pp. 268-275, 2000.
- [10] D. T. Pham and G. Jin "Genetic Algorithm using Gradient-like Reproduction Operator", *Electronics Letters*, Vol. 31, No. 18, pp. 1558-1559, 1995
- [11] 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.
- [12] J. H. Kim and H. Myung, "A Two-phase Evolutionary Programming for General Constrained Optimization Problem," *Proc. 5th Annual Conf. on Evolutionary Programming*, San Diego, 1996

- [13] Z. Michalewicz and C. Z. Janikow, "Handling Constraints in Genetic Algorithms," Proc. 4th Int. Conf. on Genetic Algorithms, R. K. Belew and L. B. Booker(Eds), pp. 151-157, San Diego, 1991
- [14] Z. Michalewicz, Genetic Algorithms+Data Structures=Evolution Programs, Springer-Verlag, Berlin, 1996
- [15] M. Gen and R. Cheng, Genetic Algorithms and Engineering Design, John Wiley & Sons, Inc., N.Y.,1997
- [16] L. Davis and M. Steenstrup, "Genetic Algorithms and Simulated Annealing: An Overview, In Genetic Algorithms and Simulated Annealing" L. Davis(Ed), Morgan Kaufmann Publishers, LA, pp. 1-11, 1987
- [17] R. Nakano and T. Yamada, "Conventional Genetic Algorithms for Job-Shop Problem, "Proc 4th Int. Conf. on Genetic Algorithms, R. Belew and L.B.Book(Eds), Morgan Kaufmann Publishers, CA, pp. 477-479, 1991
- [18] G. Liepins, M. Hilliard, J.Richardson and M.Pallmer, "Genetic Algorithm Application to Set Covering and Traveling Salesman Problems"OR/AI:The Integration of Problem Solving Strategies, Brown(Ed), 1990
- [19] D. Orvosh and L. Davis, "Using a Genetic Algorithm to optimize Problems with Feasibility Constraints," D.Fogel(Ed), Proc. 1st IEEE Conf. on Evolutionary Computation, IEEE Press, Orlando, FL, pp. 548-552, 1994
- [20] G. A. Vignaux and Z. Michalewicz, "Genetic Algorithms for the Transportation Problem" Proc. 4th Int. Symp. on Methodologies of Intelligent Systems, Charlotte, pp. 252-259, 1989
- [21] Z. Michalewicz, Genetic Algorithms+Data Structures=Evolution Programs, Springer-Verlag, Berlin, 1996
- [22] A. E. Bryson and Yu-Chi Ho, Applied Optimal Control, Ginn and Company, London, 1969
- [23] P. R. Adby and M. A. H. Dempster, Introduction to Optimization Methods, Chapman and Hall Ltd., London, 1974
- [24] J. T. Richardson, M. R. Palmer, G. Liepins and M. Hilliard, "Some Guidelines for Genetic Algorithms with Penalty Functions,"Proc. 3rd Int. Conf. on Genetic Algorithms, J. Schaffer(Ed), Morgan Kaufmann Publishers, LA, pp. 191-197, 1989,
- [25] A. E. Smith and D. M. Tate, "Genetic Optimization using a Penalty

Function,” Proc. 5th Int. Conf. on Genetic Algorithms, S. Forrest(Ed), Morgan Kaufmann Publishers, LA, pp. 499-505, 1993

[26] A. Homaifar, C. Qi and S. Lai “Constrained Optimization via Genetic Algorithms, Simulation,” Vol. 62, No.4,pp. 242-254, 1994



감사의 글

인생의 많은 목표들 중에 한 가지를 이 감사의 글을 마지막으로 이루게 되었습니다. 아직도 논문이 마무리 되었다는 것에 대해 실감이 나지 않습니다. 이번 기회로 얼마나 많은 분들께 사랑 받고 보살핌 받고 있었는지 한번 더 실감하는 계기였습니다.

누구보다도 학부시절 뿐만 아니라 지금까지도 지성뿐만 아니라 인성적으로도 많은 가르침을 주시는 소명옥 교수님 감사합니다. 또한 바쁘신 와중에도 심사 및 면밀한 지도로 논문의 깊이를 더해주시는 오진석 교수님, 유희한 교수님께 깊이 감사드립니다. 지금은 영국에 계시는 진강규 교수님 연구에 많은 도움을 주셔서 감사합니다.

연구실에 들어와서 적응하고 본 논문을 마무리하는데까지도 많은 도움을 주신 항만 연수원의 이윤형 교수님, 해기연수원의 류기탁 교수님, 만디젤코리아의 안종갑 과장님 감사합니다. 많이 모자라는 연구실 후배입니다. 선배님들이 가신 길을 이번기회에 아주 조금이나마 맛보고 참 지금까지의 모습이 있기까지 얼마나 많은 노력을 하셨을지..... 정말 대단하고 멋있으십니다. 많이 모자라지만 조금이나마 닦고 싶은 존경하는 마음과 이번 논문에 많은 도움을 주신 것에 고개 숙여 감사드립니다. 그리고 권석경 선배! 연구실에서 같이 공부할때부터 지금까지 항상 곁에서 함께 해주어 항상 감사합니다. 함께 졸업하는 승효야 너도 고생 많았다. 함께 해줘서 너무 고마워.

정신없이 직장 일에 치여 잠시 잊고 있었던 감사한 분들이 많이 떠오릅니다. 언제 또 이렇게 펜을 들게 될지는 모르겠습니다만 제 인생에 오랫동안 계획했던 일들 중 하나를 무사히 마칠 수 있게 된 기쁨과 좀 더 잘 해보고 싶었던 아쉬움이 교차합니다. 이 경험이 제 인생의 또 다른 기회가 될 수 있는 밑거름이 되기를 바라며, 한창 바쁜 시즌에도 논문작업을 마칠 수 있도록 많은 편의를 봐주신 팀장님과 대리님 직장 동료 분들께도 많은 감사드립니다.

마지막으로 항상 믿고 묵묵히 딸래미를 응원하시는 아버지 어머니, 우리 막내 양지 지 사랑합니다.

감사하는 마음을 담아.....

양 아 영 올림