

유전자 알고리즘을 이용한 하이브리드 퍼지 논리 제어기의 설계

Design of a Hybrid Fuzzy Logic Controller by Means of Genetic Algorithm

김종영* · 이대근* · 오성권**

Abstract

In this paper, design of the hybrid fuzzy logic controller by means of the genetic algorithm is proposed. The conventional PID controller with linear relation to plants becomes so sensitive to the control environments and the change of parameters that the efficiency of its utility for the complex and nonlinear plant has been questioned in transient state. In this paper, first, a hybrid fuzzy logic controller(HFLC) is proposed. The control input of the system in the HFLC is a convex combination by a fuzzy variable of the FLC's output in transient state and the PID's output in steady state. Second, a auto-tuning algorithm is presented to automatically improve the performance of hybrid fuzzy logic controller, utilizing the simplified reasoning method and the genetic algorithm. The algorithm estimates automatically the optimal values of scaling factors, PID parameters and membership function parameters of fuzzy control rules according to the rate of change and limitation condition of control output. Controllers are applied to the process with time-delay and the DC servo motor. Computer simulations are conducted at the step input and the system performances are evaluated in the ITAE(Integral of the Time multiplied by the Absolute value of Error).

I. 서론

기존의 PID제어기는 파라미터 동조나 설계의 간

편성 때문에 PID 제어기가 산업 플랜트의 제어에서 가장 잘 정립되어 있고 광범위하게 사용되는 방법이다. 그러나 플랜트와 선형적인 관계를 가지는 기존의 PID 제어기는 제어 환경 및 파라미터의 변화에 민감하며, 복잡하거나 비선형적인 플랜트에서는 좋

* 원광대학교 제어계측공학과 석사과정

** 원광대학교 제어계측공학과 부교수

은 결과를 얻을 수 없다[10,11,15].

퍼지 논리 제어기는 인간의 경험 및 지식에 근거하는 다수의 언어적 제어 규칙을 사용하기 때문에 플랜트가 비선형적일 경우 퍼지 논리 제어기로 플랜트를 제어하는 것이 적절함이 증명되어져 왔다. 그러나 인간의 지식을 완벽하게 언어적 제어규칙으로 표현하는 데는 어려움이 있으며 퍼지 제어기의 구성에 있어서 가장 어려운 문제의 하나가 대상 플랜트에 적합한 언어 제어 규칙의 선정 및 적절한 파라미터의 선정이라고 할 수 있다. 따라서 이런 인자들은 제어 성능 향상의 중요 요소로서, 공정응답 해석에 의한 새로운 자동동조방법이 요구되어지고 있다. 이 논문에서 체계적이고 효율적으로 자동동조 하기 위해 릴레이 자동동조방법과 유전자 알고리즘의 최적화 방법을 제안한다. 이 논문에서는 첫째, 퍼지 논리 제어기와 기존의 PID 제어기로 구성된 하이브리드 퍼지 논리 제어기를 제안한다. 즉, 시스템의 제어입력은 퍼지 변수로서 과도상태에서의 FLC 출력과 정상상태에서의 PID 출력의 컨벡스(convex) 결합이다. 둘째, 간략추론법, 유전자 알고리즘을 이용한 자동동조 알고리즘이 하이브리드 퍼지 논리 제어기의 성능을 개선하기 위해 사용된다. 이 방법은 제어출력 변화율 및 제한조건에 의해 퍼지 환산계수(Scaling factor), 제어 파라미터, 퍼지 제어규칙의 멤버쉽 함수 파라미터 등을 자동으로 동조한다[18,19].

제안된 방법의 성능을 평가하기 위하여 시간지연을 갖는 공정 시스템과 직류서보 전동기 시스템을 시뮬레이션 하였으며, 오버슈트 개선과 빠른 정정시간의 높은 효과를 위해 성능지수 ITAE(Integral of product Time and Absolute Error)를 사용한다.

II. 본론

2.1 제어기의 설계

2.1.1 PID제어기

PID 제어기는 오차 E(설정값과 공정출력과의 차)에 비례하여 출력을 내는 비례동작(Proportional action : P동작), E의 적분에 비례하여 출력을 내는 적분동작(Integral action : I동작)과 E의 미분에 비례하여 출력을 내는 미분동작(Derivative action : D동작)의 조합으로 표현된다. PID 제어기의 기본식은 P, I, D 세 가지의 동작의 합으로 식 (1)과 같이 표현된다. 그림 1은 PID제어기의 구성도이다.

$$y(t) = K_c \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (1)$$

여기서, K_c : 비례 이득, T_I : 적분시간,

T_D : 미분시간, $e(t) = r(t) - y(t)$,

$r(t)$: 설정값, $y(t)$: 공정출력값

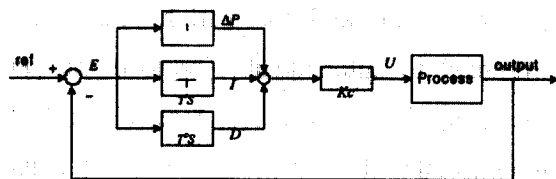


그림 1. PID 제어기의 구성도

Fig. 1. The scheme of PID controller

2.1.2 퍼지 논리 제어기

퍼지이론이 1965년 Zadeh에 의해 제창된 이래 여러 분야에서 응용되어 왔다. 그 중 눈에 띄는 결과를 내놓는 분야가 제어분야이다. 제어분야에 대해 퍼지의 응용 가능성을 보여준 것은 1974년에 런던대학의 Mamdani 교수의 Application to control of simple dynamic plant라는 논문에서였고, 이에 근거해 같은

해 스텝엔진에 퍼지를 적용, 성공적으로 제어하였다. 이것이 퍼지제어의 첫 응용이라 할 수 있다. 퍼지 제어는 퍼지 이론의 응용 분야로서 가장 빨리 활용되어 성공을 거둔 분야이다. 퍼지 제어 기법은 인간의 사고에 기인한 애매한 제어 알고리즘을 사용하여 공정 제어 및 비선형 제어에 대하여 기존의 제어 시스템보다 탁월한 성능이 입증되었다. 퍼지 제어기는 비선형 시스템 제어에 있어서 수학적 모델링을 요구하지 않으며, 입출력 변수의 정의와 IF-THEN 형식의 언어적 규칙으로 정성적 지식만 있으면 만족 할 만한 능력을 발휘하는 제어기를 설계 할 수 있는 장점을 지니고 있다.

2.1.2.1 퍼지제어기와 퍼지제어 추론방법

퍼지 제어의 이산형, 연속형에 의한 퍼지 제어기를 구성하기 위한 퍼지 제어 추론의 기본 알고리즘을 아래에 기술했다. 퍼지 제어기의 기본적인 구성도를 그림 2에 보여주고 있다. 그림 2에서 퍼지 제어기는 퍼지제어기 오차, 오차변화의 환산계수 GE, GD와 제어출력의 환산계수 GC 그리고 퍼지 제어규칙으로 구성된다. 퍼지 제어 알고리즘은 일반적으로 식 (2)의 형태를 취하는 N개의 독립적인 제어규칙들로 구성된다.

$$R_k : \text{IF } E \text{ is } A_i, \Delta E \text{ is } B_j \text{ THEN } \Delta U \text{ is } C_i \quad (2)$$

여기서, R_k : k 번째의 제어 구현 규칙

$$(k=1,2, \dots, N),$$

E : 오차(error)값, ΔE : 오차의 변화값,

ΔU : 플랜트 제어 입력의 변화값,

A_i, B_j : 퍼지 변수,

C_i : 실수치($i=1,2, \dots, N$)

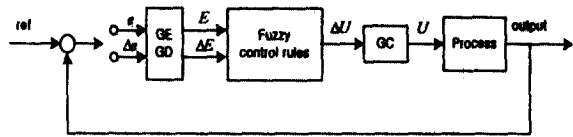


그림 2. 퍼지 제어기의 기본 구성도

Fig. 2. Basic scheme of fuzzy controller

전반부 및 후반부의 언어적 제어 변수는 오차(E) 및 오차의 변화값(ΔE)에 대해 NB(negative big), NM(negative middle), NS(negative small), ZO(zero), PS(positive small), PM(positive middle), PB(positive big)의 7개로 구성되어 있으며 전체적인 제어 규칙은 표 1과 같다. 본 논문에서는 퍼지 추론의 멤버쉽 함수는 이웃하는 멤버쉽 함수와 보수적인 관계를 가지는 삼각형 형태의 멤버쉽 함수를 사용한다.

표 1. 퍼지 제어규칙

Table 1. Fuzzy control rules

		ΔE						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
E	NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZO
	NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZO	PS
	NS	NB	NB	NM	NS	ZO	PS	PM
	ZO	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
	PS	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	PB
	PM	NS	ZO	PS	PM	PB	PB	PB
	PB	ZO	PS	PM	PB	PB	PB	PB

각각의 규칙에 있어 전반부의 추론값은 식 (3)에 의해 계산된다.

$$W_i = \min \{ \mu_{A_i}(E_k), \mu_{B_j}(\Delta E_k) \} \quad (3)$$

만약 식 (2)의 후반부 C_i 가 퍼지값이 아닌 단일집합 즉, 단일상수라면 퍼지 제어기의 비퍼지화값은 간략추론방법인 식 (4)로부터 구한다.

$$\Delta U = \frac{\sum_{i=1}^N W_i C_i}{\sum_{i=1}^N W_i} \quad (4)$$

제어기에 사용되는 오차, 오차 변화값, 프로세스 제

어 입력 변화의 값은 환산계수를 곱함으로써 그 프로세스에 맞게 식 (5)와 같이 변환된다.

$$E(nT) = (R - y(nT)) \times GE = e(nT) \times GE$$

$$\Delta E(nT) = (e(nT) - e((n-1)T)) \times GD = \Delta e(nT) \times GD$$

$$U(nT) = \Delta U(nT) \times GC \quad (5)$$

환산계수 추정하기 위한 자동동조 퍼지 제어기의 구성도는 그림 3과 같다. 평가를 위한 성능지수로 ITAE를 사용하고 동조 알고리즘으로는 유전자 알고리즘을 사용하였다. 유전자 알고리즘으로 초기값을 동조하고, 다시 최적의 환산계수를 구하기 위해 유전자 알고리즘으로 동조한다. 제어기의 성능을 향상시키기 위해 퍼지 제어규칙의 멤버십 함수 파라미터를 유전자 알고리즘으로 다시 동조한다.

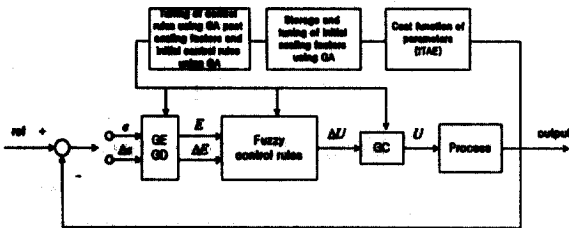


그림 3. 환산계수 추정을 위한 자동동조 퍼지 논리제어기의 구성도

Fig. 3. The scheme of auto-tuning fuzzy controller for estimation of scaling factors

2.1.3 하이브리드 퍼지 논리 제어기(HFLC)

하이브리드 퍼지 논리 제어기란 기존의 PID 제어기의 장점과 퍼지 제어기의 장점을 융합하여 설계한 하이브리드형 퍼지 제어기이다. 공정 제어분야에서 가장 많은 부분을 차지하는 PID 제어의 장점은 정확한 프로세스 모델을 필요로 하지 않고, PID 제어 파라미터의 물리적 의미가 분명하고, 제어 시스템 설치 후 파라미터가 쉽게 조정된다는 것이다. 그러나 단점으로는 프로세스가 긴 지연시간과 강한 비선형성을

내포하고, 프로세스 자체 특성이 일정하지 않고 잦은 부하변동 및 프로세스 잡음이 존재하는 경우 PID 제어만으로는 만족한 결과를 얻을 수 없다. 이러한 단점을 보완할 수 있는 견고성 제어가 가능한 퍼지 제어를 융합한 하이브리드형 제어기와 동조 알고리즘을 사용하여 그 성능을 개선한다. 하이브리드 퍼지 논리 제어기의 기본 구조는 그림 4와 같다. e 는 오차, Δe 는 오차의 변화, $\Delta^2 e$ 는 변동오차의 변화, ΔU 는 플랜트 제어입력의 변화, GE, GD, GH, GC는 퍼지 환산계수, K_c 는 비례이득, T_i 는 적분시간, T_D 는 미분시간, $(1-\alpha)$ 는 퍼지 제어기의 하중계수, α 는 PID제어기의 하중계수, U_{PID} 는 PID 제어기의 조작량, U_F 는 퍼지 PID 제어기의 조작량, U 는 하이브리드 퍼지 논리 제어기의 조작량을 나타낸다. PID 제어기와 퍼지 제어기의 효과적인 합성을 위해 이들 하중계수를 이용하게 되는 데 이 하중 계수를 삼각형 형태의 멤버십 함수로 그림 5와 같이 $\alpha = \mu_{ZR}(e)$ 로 구성된다. 설정치와 출력의 절대오차가 크면 α 는 작으므로 퍼지 제어기의 영향이 크고, 그 반대이면 PID 제어기의 영향이 크게된다. 따라서, 하이브리드 퍼지 논리 제어기의 출력은 식 (6)과 같다.

$$U = \alpha \cdot U_{PID} + (1 - \alpha) \cdot U_F \quad (6)$$

멤버십 함수 형태는 선형특성을 가지는 삼각형 형태를 사용해서 제어기의 성능을 향상시킨다.

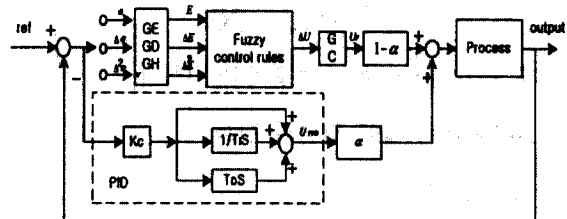


그림 4. 하이브리드 퍼지 제어기의 구성도
Fig. 4. The scheme of HFLC

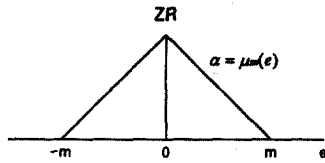


그림 5. 하중계수의 멤버쉽 함수

Fig. 5. Membership function of weighting coefficient

그림 6은 환산계수, 제어 파라미터, 퍼지 제어규칙의 멤버쉽 함수 파라미터 등을 추정하기 위한 자동동조 하이브리드 퍼지 논리 제어기의 구성도이다.

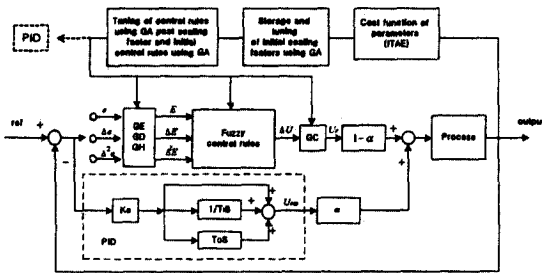


그림 6. 환산계수와 제어 파라미터 추정을 위한 자동동조 HFLC의 구성도

Fig. 6. The scheme of auto-tuning HFLC for estimation of scaling factors and control parameters

2.2. 최적화 자동동조 알고리즘

본 논문은 최적화 자동동조방법으로 릴레이 자동동조방법과 유전자 알고리즘을 이용한 자동동조 알고리즘을 제안한다. 자동동조방법은 제어기의 성능을 개선하기 위해 사용된다. 이 방법들은 출력 변화율 및 제한조건에 의해 환산계수, 제어 파라미터, 퍼지 제어규칙의 멤버쉽 함수 파라미터 등을 자동 동조한다.

2.2.1 릴레이 자동동조방법

Ziegler-Nichols(Z-N)[1,2,5] 동조방법을 사용하여

제어기의 파라미터를 동조한다. 이 방법은 비례기의 이득 K_c 의 값을 증가시키면서 진동하게 되는 값을 찾는다. 이 값이 임계이득 K_{cu} 가 되고, 이때 진동하는 주기가 임계주기 P_u 이다. 이렇게 구해진 값을 이용하여 표 2의 Z-N 동조 관계식으로부터 제어기의 파라미터를 계산하게 된다.

표 2. Z-N 동조 관계식

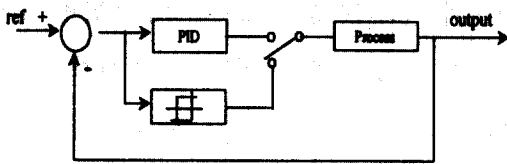
Table 2. Tuning relation equation of Z-N

	K_c	τ_I	τ_D
P	$0.5 K_{cu}$		
PI	$0.45 K_{cu}$	$0.85 P_u$	
PID	$0.6 K_{cu}$	$0.5 P_u$	$0.125 P_u$

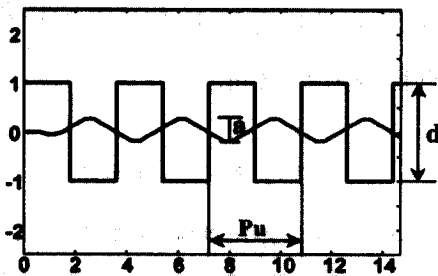
임계이득을 구하기 위해서 공정의 출력이 진동하게 될 때까지 이득을 계속 증가시켜야 하는데, 이 방법은 엔지니어들의 많은 주의가 요구된다. Aström과 Hägglund는 임계이득과 임계주기를 자동으로 구하기 위해 릴레이 자동동조방법을 제안했다. 릴레이 동조 실험은 그림 7(a)에 보인 것과 같이, 임계진동을 생성하기 위해 불가영역을 갖는 릴레이를 사용하며, 릴레이는 공정출력의 오차가 설정값보다 크면 최소값을 가지고, 오차가 설정값보다 작으면 최대값을 가지도록 동작한다. 릴레이 동조 실험결과 공정의 출력과 릴레이의 출력이 그림 7(b)에 있다. 이 출력파형으로부터 임계주기 P_u , 그리고 식 (7)를 이용하여 임계이득을 구할 수 있다.

$$K_{cu} = \frac{4d}{\pi a} \quad (7)$$

여기서, d는 릴레이의 진폭이고, a는 측정된 공정진동의 진폭이다.



(a) 릴레이 제어하에 궤환루프



(b) 릴레이 제어하에 입출력 신호

그림 7. 릴레이 동조실험

Fig. 7. Tuning experiment by relay

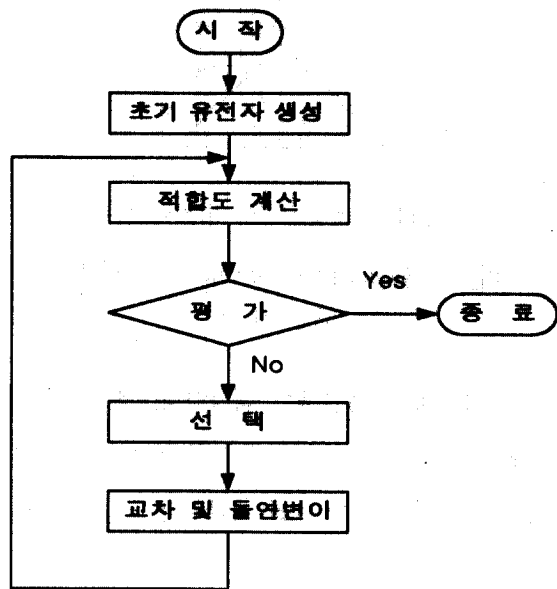


그림 8. 유전자 알고리즘의 수행순서

Fig. 8. Flowchart of genetic algorithm

2.2.2 유전자 알고리즘

공정을 수행하기 전에 설정해 주어야 하는 여러 종류의 제어 파라미터, 퍼지 환산계수, 퍼지 제어규칙의 멤버쉽 함수 파라미터 등이 있다. 이러한 인자들은 제어기의 성능에 민감하게 작용하기 때문에, 이 값들을 최적으로 설정해주는 것이 공정의 성능을 높이는데 중요한 역할을 한다. 본 논문에서는 이 값들을 최적으로 설정해 주기 위하여 유전자 알고리즘을 이용해 모델의 최적화 과정을 수행하게 된다. 제안된 모델의 최적화를 위하여 사용된 유전자 알고리즘은 2진(binary)형태의 직렬 방식을 사용하였고, 선택(selection)연산으로 roulette-wheel 방식, 교차(crossover)연산은 one-crossover 방식, 돌연변이연산은 선택된 비트를 반전시키는 invert 방식을 사용하였다 [6,7,8].

그림 8은 유전자 알고리즘의 수행과정을 보여주며, 수행과정을 다음과 같다.

[단계 1] 탐색지점을 의미하는 다수의 개체를 랜덤하게 설정함으로써 시작한다. 탐색을 시작할 초기값을 가지고 있다면 초기값을 랜덤값 대신 사용하면 된다.

[단계 2] 설정된 초기값들은 목적함수의 다른 표현인 '적합도(fitness)'를 통해 다음세대의 번식에 참여할 수 있는 개체들을 선택하는 재생산(reproduction) 연산을 수행하는데, 적합도가 높을수록 선택될 확률이 높아진다.

[단계 3] 선택된 개체들은 부모세대로써 짝을 맺어서로의 유전자를 적절히 배합하는 교차 연산을 수행하고, 자식 세대를 탄생시킨다.

[단계 4] 자식 세대를 생성하는 과정에서 비트로 취급되는 염색체를 '0'에서 '1', 또는 '1'에서 '0'으로 반전시키는 돌연변이 연산이 수행된다. 돌연변이 연산을 수행함으로써 잠재적인 유전특성을 표면적으로 드러나게 하며, 기존의 개체들이 가지지 못한 새로운 특성도 가지게 된다. 자연계의 진화과정도 '적자

생존'과 '돌연변이'에 의해 일어나듯이, 유전자 알고리즘도 '재생산(reproduction)연산'으로 대변되는 '적자생존'과, '돌연변이(mutation)연산'으로 대변되는 '돌연변이'에 의해 진화하게 되는 것이다.

[단계 5] 이렇게 얻어진 새로운 세대는 또 다음 세대를 만들기 위해서, 적합도를 판단하여 적절한 개체를 선택하고, 교배와 돌연변이를 일으켜 한 세대를 만들어낸다. 이러한 일련의 과정을 만족할만한 수준에 도달할 때까지 반복 수행시킨다.

2.3 지능형 제어기의 설계

본 논문에서 제안한 지능형 제어기인 퍼지 논리 제어기, 하이브리드 퍼지 논리 제어기 등을 기존의 제어기와 비교하여 제어기 성능을 평가하고, 제어 파라미터, 퍼지 환산계수, 퍼지 제어규칙의 멤버십 함수 파라미터 등을 유전자 알고리즘을 동조해서 제어기의 성능을 개선시킨다. 그림 12는 지능형 제어기의 설계를 위한 단계별 수행과정을 보여주며, 수행과정을 단계별로 살펴보면 다음과 같다.

[단계 1] 공정 제어 대상에 따라 본 논문에서 제안된 다음 형태 중에서 제어기를 선택한다.

- (1) 기존의 PI, PID 제어기
- (2) FPI, FPID 제어기 (Fuzzy형 PID)
- (3) HPID 제어기 (Hybrid형 PID)

[단계 2] 제어규칙의 퍼지변수의 수와 초기 제어규칙을 결정하며 멤버십 함수 형태는 삼각형으로 한다. 그림 9와 그림 10에서 입출력변수의 멤버십 함수는 [-1,1]에 의해 균준화 된 값을 표시한다.

[단계 3] 제어기의 구성요소의 초기값을 선정하고 제어성능 개선을 위한 방법을 정한다. 초기값 선정은 릴레이 동조방법, 유전자 알고리즘을 사용한다. 제어 성능 개선을 위해 멤버십 함수 조정, 환산계

수의 조정, 퍼지 제어규칙의 조정이 있다.

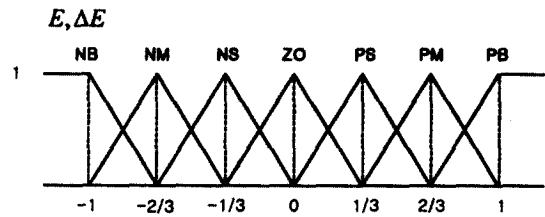


그림 9. 전반부 입력변수 $E, \Delta E$ 의 초기 멤버십 함수

Fig. 9. Initial membership functions of premise input variables $E, \Delta E$

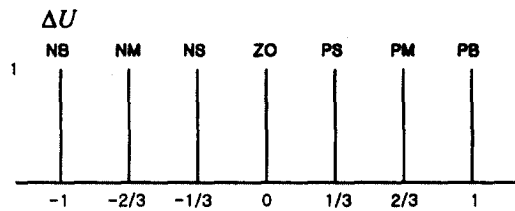


그림 10. 후반부 출력변수 ΔU 의 초기 멤버십 함수

Fig. 10. Initial membership functions of consequence output variables ΔU

1. 퍼지 환산계수와 제어 파라미터를 조정함으로써 성능을 개선한다. 하이브리드 퍼지 논리 제어기는 퍼지 제어기와 기존의 제어기를 결합한 경우로 퍼지 환산계수와 제어 파라미터를 조정한다.
2. 환산계수와 제어 파라미터를 조정 후 퍼지 제어규칙의 멤버십 함수 파라미터를 조정함으로써 성능을 개선한다. 기본적인 FPID제어기 형태를 표현하는 경우는 환산계수 GE, GD, GH, GC 와 ΔU 의 퍼지 제어규칙의 멤버십 함수 파라미터 $m1, m2, m3$ 을 조정한다. 각 입력에 대해 3개의 퍼지변수를 가지는 경우 조정할 퍼지 제어규칙은 표 3과 같다. 그림 11은 $E, \Delta E, \Delta^2 E, \Delta U$ 의 퍼지 제어규칙의 멤버십

함수이다.

표 3. 3변수 퍼지 제어규칙

Table 3. Fuzzy control rules for 3-fuzzy variables

(a) $\Delta^2 E = N$

		ΔE		
		N	Z	P
E	N	-m3	-m3	-m2
	Z	-m2	-m1	0
	P	0	m1	m3

(b) $\Delta^2 E = Z$

		ΔE		
		N	Z	P
E	N	-m2	-m1	0
	Z	0	m1	m2
	P	m2	m3	m3

(c) $\Delta^2 E = P$

		ΔE		
		N	Z	P
E	N	-m2	-m1	0
	Z	0	m1	m2
	P	m2	m3	m3

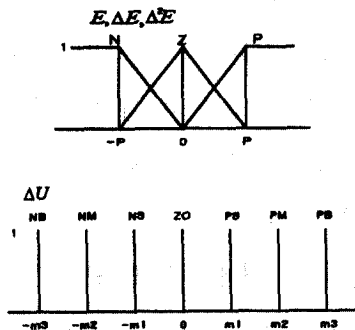


그림 11. 퍼지 제어규칙의 멤버십 함수

Fig. 11. Membership functions of fuzzy control rules

[단계 4] 자동동조 알고리즘인 릴레이 동조방법, 유전자 알고리즘을 이용하여 파라미터를 동조함으로써 향상된 출력특성을 얻는다.

[단계 5] 제어기의 성능평가를 위한 오버슈트의 개선과 빠른 정정시간의 높은 효과를 위해 성능지수로 ITAE(Integral of product Time and Absolute Error)가 주로 사용된다. 성능지수 ITAE의 식은 다음과 같다.

$$ITAE = \int t \cdot |error| dt \quad (8)$$

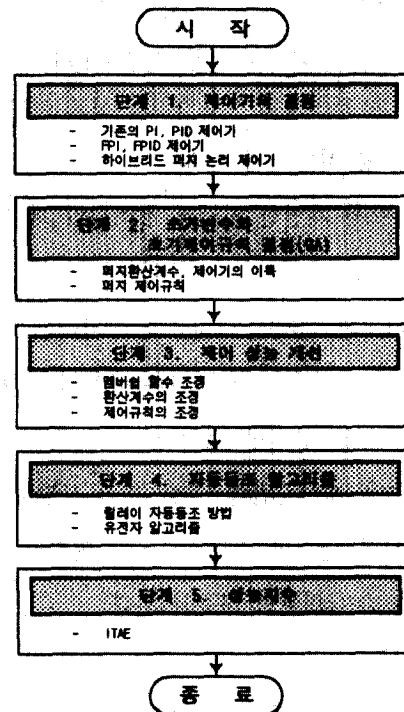


그림 12. 지능형 제어기를 위한 설계절차의 수행순서

Fig. 12. Flowchart of the design procedure for controller

2.4. 컴퓨터 시뮬레이션 결과

실 플랜트의 모든 공정은 지연시간을 갖는 1계 혹은 2계 공정 시스템으로 표현될 수 있다. 대부분의 공정 시스템은 많은 동적 요소를 가지고, 서로 다른 시정수를 가지는 High-order형이지만 이들 시스템은 1, 2계의 근사 모델로 표현할 수 있다. 따라서 본 논

문에서는 공정 시스템의 대상으로 공정 1은 식 (9), 공정 2는 식 (10)의 시간 지연을 가지는 1, 2계 선형 공정 시스템으로 설정한다. 공정 3은 수학적으로 모델링이 되어 있는 직류서보 전동기로서 속도제어 전달함수는 식 (11)처럼 구할 수 있다.

$$\text{공정1: } \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{e^{-2s}}{s+1} \quad (9)$$

$$\text{공정2: } \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{e^{-0.8s}}{(s+1)(s+2)} \quad (10)$$

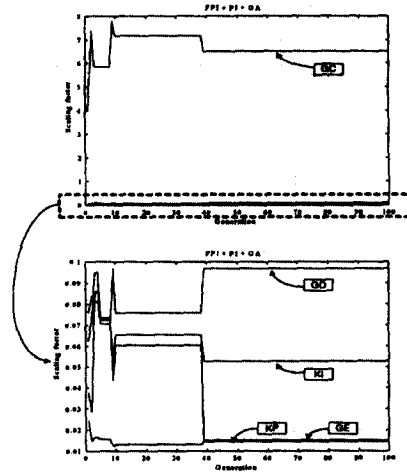
$$\text{공정3: } \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{0.2737}{5.3782 \times 10^{-7} s^2 + 0.00182s + 0.2068} \quad (11)$$

하이브리드 퍼지 논리 제어기의 자동동조 과정은 다음과 같다.

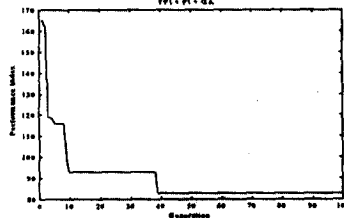
- I) 유전자 알고리즘을 이용하여 제어 파라미터와 퍼지 환산계수의 초기값을 동조한다.
- II) 제어 파라미터와 환산계수의 최적값을 동조하기 위해 유전자 알고리즘을 다시 이용한다.
- III) 최적으로 동조된 제어 파라미터와 퍼지 환산계수를 고정시킨 후, 유전자 알고리즘을 이용해서 퍼지 제어규칙의 멤버십 함수 파라미터를 동조한다.

2.4.1 공정 1

퍼지 PI제어기와 PI제어기를 결합한 하이브리드 퍼지 논리 제어기는 1계 지연시간을 갖는 공정 시스템에 적용된다. 그림 13(a)은 유전자 알고리즘을 이용한 하이브리드 퍼지 논리 제어기의 제어 파라미터 및 퍼지 환산계수의 동조과정을 나타낸다. 그림 13(b)에서 보이는 것같이 평가지수(ITAE)가 최적으로 수렴함을 알 수 있다.



(a) 동조과정의 제어 파라미터와 환산계수

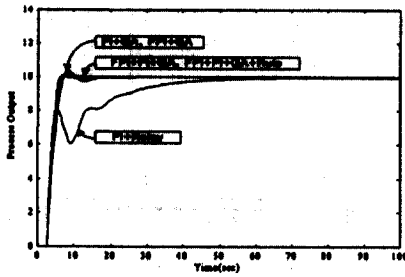


(b) 동조과정의 평가지수(ITAE)

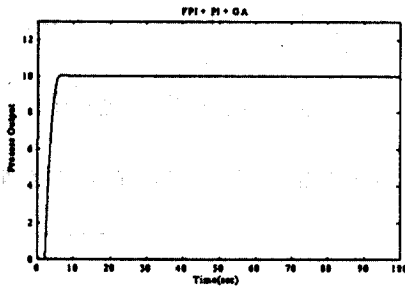
그림 13. 공정 1에서 HFLL의 제어 파라미터와 성능지수의 수렴과정

Fig. 13. The convergence procedure of control parameter and performance index in HFLL on process 1

그림 14는 적용된 제어기의 출력 파형을 보인다. 여기서, 그림 (a)는 릴레이 자동동조방법을 사용한 PI 제어기(PI+Relay), 유전자 알고리즘으로 동조한 PI 제어기(PI+GA), 퍼지 PI제어기(FPI+GA), 제어 파라미터와 퍼지 환산계수를 동조한 퍼지 제어기(FPI+PI+GA)와 퍼지 제어규칙의 멤버십 함수 파라미터를 동조한 하이브리드 퍼지 논리 제어기(FPI+PI+GA+Rule)의 공정출력 파형을 비교한 것이다. 그림(b)는 하이브리드 퍼지 논리 제어기의 출력 파형을 보인 것이다.



(a) 제어기 공정출력 파형

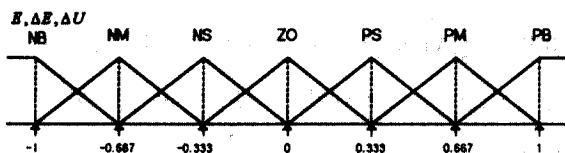


(b) 하이브리드 제어기의 출력

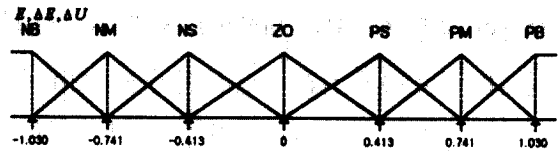
그림 14. 공정 1에서 제어기의 공정출력 비교와 제어기 출력

Fig. 14. Output comparison of controller and controller output to process 1

그림 15는 동조전과 동조후의 퍼지 제어규칙의 멤버십 함수를 나타낸 것이다. 표 4는 공정 1에서 동조전과 동조후의 성능지수, Overshoot, 제어 파라미터, 퍼지 환산계수 등을 나타내며, 표 5는 유전자 알고리즘을 사용하여 동조한 퍼지 제어규칙의 멤버십 함수 파라미터값을 나타낸 것이다. 표 4와 5에서 하이브리드 퍼지 논리 제어기(FPI+PI)가 기존의 제어기와 퍼지 제어기 보다 성능지수 ITAE와 지연시간이 감소할 수 있으며, 퍼지 제어규칙의 멤버십 함수 파라미터를 동조함으로써 Overshoot는 거의 비슷하지만, 평가지수 ITAE가 감소함을 알 수 있다.



(a) 동조전 멤버십 함수



(b) 동조후 멤버십 함수

그림 15. 공정1에서 퍼지 제어규칙의 멤버십 함수 파라미터

Fig. 15. Membership function parameters of fuzzy control rules to process 1

표 4. 공정 1에서 제어기의 성능지수(ITAE)

Table 4. Performance index of controller

제어기		PI	PI	FPI	FPI+PI
동조방법		Fuzzy	GA	GA	GA
파라미터 동조전	KP		0.430		0.024
	KI		1.959		0.076
	GE			0.159	3.992
	GD			0.054	0.038
	GC			7.789	0.062
	ITAE		125.579	147.354	164.982
파라미터 동조후	KP	0.588	0.388		0.014
	KI	0.062	1.787		0.097
	GE			0.019	6.499
	GD			0.058	0.015
	GC			5.752	0.053
	ITAE	1120.96	123.021	123.033	82.879
	Overshoot		3.382 %	3.111 %	0.405 %

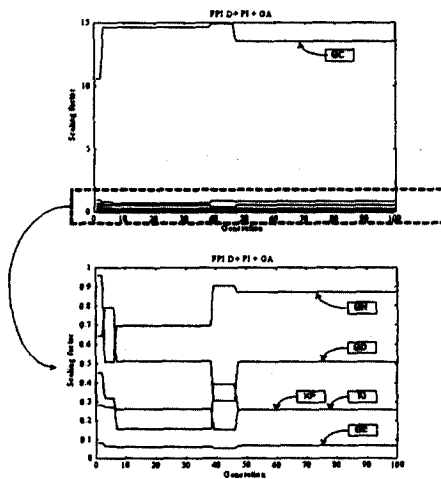
표 5. 공정 1에서 퍼지 제어규칙의 멤버십 함수 파라미터

Table 5. Membership function parameters of fuzzy control rules to process 1

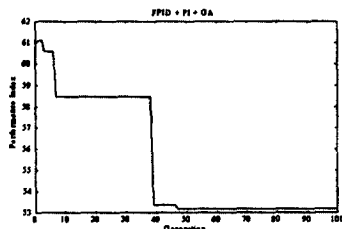
제어기		FPI + PI
동조방법		GA
퍼지 제어규칙의 멤버십 함수	m1	0.333
	m2	0.667
	m3	1
파라미터 동조전		ITAE
		82.879
퍼지 제어규칙의 멤버십 함수	m1	0.413
	m2	0.741
	m3	1.030
파라미터 동조후		ITAE
		81.154
Overshoot		0.797 %

2.4.2 공정 2

퍼지 PID제어기와 PI 제어기를 결합한 HFLC는 2계 지연시간을 갖는 공정 시스템에 적용된다. 그림 16(a)는 공정 1과 같이 제어 파라미터와 퍼지 환산계수를 유전자 알고리즘으로 동조하는 과정을 나타낸 것이다. 그림 16(b)에서 HFLC의 파라미터가 동조되면서 성능지수 ITAE의 값이 최적의 값으로 수렴함을 알 수 있다. 그림 17(a)는 적용된 제어기의 공정 출력 파형을 비교하여 나타내고, 공정 2에서 HFLC 제어기의 출력 파형을 보인 것이다.



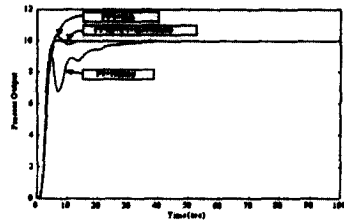
(a) 동조과정의 파라미터와 퍼지 환산계수



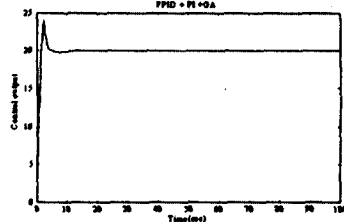
(b) 동조과정의 평가지수(ITAE)

그림 16. 공정 2에서 HFLC의 제어 파라미터와 성능지수의 수렴과정

Fig. 16. The convergence procedure of control parameters and performance index in hybrid fuzzy logic controller on process 2



(a) 제어기 공정출력 파형



(b) 하이브리드 제어기의 출력 파형

그림 17. 공정 2에서 출력파형

Fig. 17. Output comparison of controller and controller output to process 2

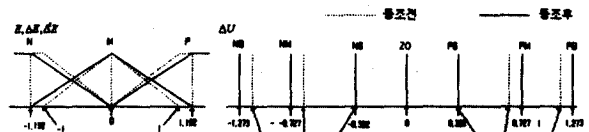


그림 18. 공정2에서 제어규칙의 멤버쉽 함수

Fig. 18. Membership function of fuzzy control rules to process 2

표 6. 공정 2에서 제어기의 성능지수(ITAE)

Table 6. Performance index of controller

제어기		PI	PI	FFI	FFD-PI
동조방법		Relay	GA	GA	GA
파라미터 동조전	KP		1.049		0.081
	KI		1.579		0.641
	GE			0.023	0.959
	GD			0.070	10.583
	GH				0.453
	GC			13.644	0.279
	ITAE		78.221	73.507	61.087
파라미터 동조후	KP	1.563	0.965		0.066
	KI	0.177	1.852		0.511
	GE			0.022	0.874
	GD			0.060	13.522
	GH				0.259
	GC			12.919	0.258
	ITAE	303.261	68.667	68.754	53.176
	Overshoot		3.371 %	3.699 %	1.034 %

그림 18은 제어기의 성능을 개선하기 위해 동조된 퍼지 제어규칙의 $E, \Delta E, \Delta^2 E, \Delta U$ 멤버십 함수를 나타낸다. 표 6은 공정 2에서 동조전과 동조후 제어기의 파라미터 값과 성능지수 ITAE의 값을 나타낸 것이다.

표 7은 유전자 알고리즘으로 동조한 퍼지 제어규칙의 멤버십 함수 파라미터값을 나타낸 것이다. 표 6과 7에서 HFLC는 Overshoot도 거의 없고, ITAE가 기존의 PI 제어기와 퍼지 PI 제어기보다 감소함을 알 수 있다.

표 7. 공정 2에서 퍼지 제어규칙의 멤버십 함수 파라미터

Table 7. Membership function parameters of fuzzy control rules to process 2

동조방법		동조후
		GA
퍼지 제어규칙의 멤버십 함수 파라미터 동조전	P	1
	m1	0.333
	m2	0.667
	m3	1
	ITAE	53.176
퍼지 제어규칙의 멤버십 함수 파라미터 동조후	P	1.192
	m1	0.322
	m2	0.727
	m3	1.273
	ITAE	47.835
	Overshoot	0.336 %

2.4.3 공정 3

퍼지 PID와 PID 제어기를 결합한 하이브리드 퍼지 논리 제어기는 직류서보 전동기의 속도제어에 적용된다. 직류서보 전동기의 토크 방정식은 식 (12), (13)과 같이 표현 될 수 있다.

$$J \frac{di_a(t)}{dt} + B\omega(t) = K_t i_a(t) \quad (12)$$

$$E_a = L_a \frac{di_a(t)}{dt} + R_a i_a(t) + K_b \omega(t) \quad (13)$$

식 (12)와 (13)을 전달함수 형태로 표현하면 식 (14)와 같이 표현된다.

$$G(s) = \frac{\omega(s)}{E_a(s)} = \frac{K_t}{L_a s^2 + (J R_a + B L_a) s + (K_t K_b + B R_a)} \quad (14)$$

여기서, $K_t = 2.17 [kg \cdot cm / A]$ (토크 정수),

$J = 0.00028 [kg \cdot cm \cdot s^2]$ (관성모멘트),

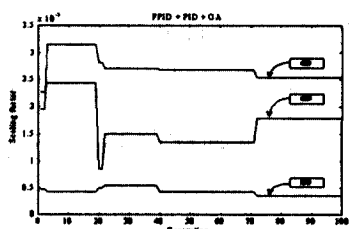
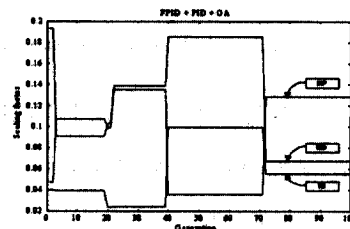
$L_a = 2 [mH]$ (전기자 인덕턴스),

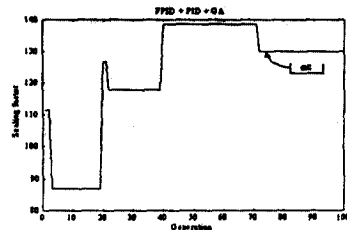
$R_a = 6.6 [\Omega]$ (전기자 저항),

$B = 0.25 [kg \cdot cm \cdot s / rad]$ (마찰계수),

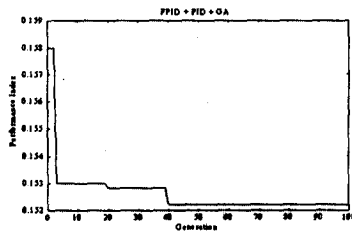
$K_b = 22.22 [V / krpm]$ (유기전압상수)

직류서보 전동기를 제어하기 위해 샘플링 시간은 0.001(sec), 출력 속도는 3000(rpm)으로 하였으며, 제어대상에 급격한 변화와 과대한 조작량을 주어 조작단 및 직류서보 전동기의 수명 단축되어지므로 조작신호에 상하한 제한을 주어 직류서보 전동기의 각종 제약조건에 적합하게 제어를 하였다. 그림 19(a)는 파라미터와 퍼지 환산계수의 동조 과정을 나타내고, (b)는 성능지수 ITAE의 수렴과정을 나타내고 있다.





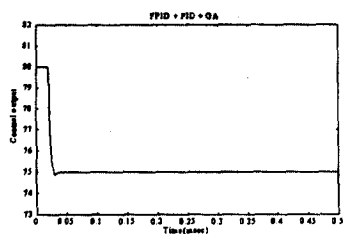
(a)



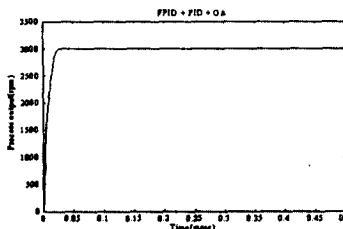
(b)

그림 19. 공정 3에서 제어 파라미터와 환산계수의 동조과정과 ITAE

Fig. 19. The convergence procedure of control parameters and fuzzy scaling factors and ITAE on process 3



(a) 제어기 출력값



(b) 무부하시 전동기출력

그림 20. 전동기 회전시 제어기 출력과 모터 속도 출력

Fig. 20. Control output and motor velocity output at motor rotation

표 8. 공정 3에서 제어기의 성능지수(ITAE)

Table 8. Performance index of controller to process 3

제어기		PI	FFI	FFI+PI
동조방법		GA	GA	GA
파라미터 동조전	KP	0.04443		0.04729
	KI	0.00431		0.04009
	KD			0.19303
	GE		0.000029	0.00047
	GD		0.000187	0.00195
	GH			0.00227
	GC		188.3354	111.33724
	ITAE	0.40242	0.16405	0.15799
파라미터 동조후	KP	0.04780		0.12803
	KI	0.00478		0.05513
	KD			0.06735
	GE		0.000029	0.00036
	GD		0.000168	0.00255
	GH			0.00179
	GC		197.3666	129.79375
	ITAE	0.37716	0.14996	0.13224

그림 20은 직류서보 전동기의 제어기의 출력과 무부하 상태에서 직류서보 전동기의 속도를 나타낸 것이다.

표 8은 성능지수, Overshoot, 제어 파라미터, 퍼지 환산계수의 값을 나타내며, 표 8에서 하이브리드 퍼지 논리 제어기는 무부하시 기존의 제어기와 비슷한 성능을 보이지만 상승시간과 지연시간이 빠르다는 것을 알 수 있다.

III. 결론

본 논문에서 유전자 알고리즘을 이용한 하이브리드 퍼지 논리 제어기를 제안했다.

첫째로, 제어기의 파라미터, 퍼지 환산계수, 퍼지 제어규칙의 멤버십 함수 파라미터값을 동조하기 위해

릴레이 동조 방법과 유전자 알고리즘을 제안했다.

둘째로, 시스템의 제어입력이 퍼지변수에 의해 과도 상태에서 FLC(Fuzzy Logic Controller)의 출력과 정상상태에서 기존의 제어기를 컨벡스(convex)결합으로 구성된 하이브리드 퍼지 논리 제어기를 제안했다.

셋째로, 하이브리드 퍼지 논리 제어기로 FPI+PI, FPID+PI, FPID+PID 형태로 결합한 제어기를 제안했다.

컴퓨터 시뮬레이션으로부터 다음과 같은 결론을 이끌어낼 수 있다.

1. 1계 지연특성을 갖는 공정 1에서 하이브리드 퍼지 논리 제어기(FPI+PI)는 기존 제어기와 비교해 Overshoot는 비슷하지만, 성능지수가 감소함을 알 수 있다.
2. 2계 지연특성을 갖는 공정 2에서 하이브리드 퍼지 논리 제어기(FPID+PI)는 기존의 제어기와 퍼지 제어기에 비해 Overshoot가 거의 없으며, 상승시간과 성능지수가 감소함을 알 수 있다.
3. 공정 3(직류서보 전동기)에서는 무부하 상태에서 정회전 실험을 실시 할 때 하이브리드 퍼지 논리 제어기(FPID+PID)는 거의 같지만 상승시간, 안정시간, 성능지수(ITAE)가 감소함을 알 수 있고 속응성, 적응성이 우수함을 알 수 있다.

【참 고 문 헌】

[1] ZIEGLER, J.G, and NICHOLS, N.B, "Optimum settings for automatic controllers", *Trans. ASME*, 1942, 65, pp.433-444.

[2] HANG, C.C, LIM, C.C, and SOON, S.H, "A new PID auto-tuner design based on correlation technique". *Proc. 2nd Multinational Instrumentation Conf.*, China, 1986.

[3] HANG, C.C, and Aström K.J, "Refinements of the Ziegler Nichols tuning formula for PID auto-tuners". *Proc. ISA Conf.*, USA.

[4] Aström, K.J, C.C, HANG, P. PERSSON (1988), "Heuristics for assessment of PID control with Ziegler-Nichols tuning", *Automatic Control*, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden.

[5] Aström, K.J, "Ziegler-Nichols auto-tuners", *Report TFRT-3167*, Dept. of Automatic Control, Lund Inst. of Tech., Lund, Sweden.

[6] Zbigniew Michalewicz, "Genetic Algorithm + Data Structures = Evolution programs", Springer verlag.

[7] 「Goldberg 1989」 D.E. Goldberg, "Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning", Addison-Weatley, 1989.

[8] 「Koza 1992」 J.R. Koza. "Genetic Programming : On the Programming of Computers by means of Natural Selection", MIT Press, 1992.

[9] 「Srinivas & Patnaik 1994」 M.Srinivas and L.M. Patnaik, Genetic Algorithms : a survey, *IEEE Computer*, June 1994, pp. 17-26.

[10] T.Terano, K.Asai and M, Sugeno, "Applied Fuzzy Systems", AP Professional, 1994.

[11] T.j.Procyk and E.H.Mamdani, "A linguistic synthesis of fuzzy controller," *Automatica*,

vol.15,pp.15-30, 1979.

[12] S.Daley and K.f.Gill, " Comparison of a fuzzy logic with a P+D control law," *Transaction of the ASME*, vol.111,pp.128-137,1989.

[13] A.Viectek etc., "Fuzzy approach to the design of the simple control algorithm," *World congress*, vol.6, 1984.

[14] S.Tzafestas, "Incremental fuzzy expert PID control," *IEEE Trans on Industrial Electronics*, vol.37, no.5, 1990.

[15] Xian-Tu Peng, "Self-regulating PID controllers and its applications to a temperature controlling process," *Fuzzy Computing*, pp.355-364, North Holland, 1988.

[16] L.A.Zadeh, "Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision process," *IEEE Trans, Syst. Man and Cybern.*, pp.28-44, 1973.

[17] J.Malers and Y.S.Sherif, "Application of fuzzy set theory," *IEEE Trans. Syst. Man and Cybern.*, vol. Smc-15,no.1, 1985.

[18] Sungkwun Oh, Taechon Ahn, Hyungsoo Hwang, Jongjin Park and Kwangbbang Woo, " Design of a Hybrid Fuzzy Controller with the Optimal Auto-tuning Method ," *Journal of Control, Automation and Systems Engineering*, Vol. 1, No. 1, September, 1995.

[19] 오성권, "퍼지모델 및 제어이론과 프로그램", 기 다리출판사, 1999.