

유전자 알고리즘에 의한 HFC의 최적 제어파라미터 추정 및 설계

論 文

49D-11-2

Estimation of Optimal Control Parameters and Design of Hybrid Fuzzy Controller by Means of Genetic Algorithms

李大根* · 吳聖權** · 張成煥*** · 金龍洙§

(Dae-Keun Lee · Sung-Kwun Oh · Sung-Whan Jang · Yong-Soo Kim)

Abstract - The new design methodology of a hybrid fuzzy controller by means of the genetic algorithms is presented. First, a hybrid fuzzy controller(HFC) related to the optimal estimation of control parameters is proposed. The control input for the system in the HFC combined PID controller with fuzzy controller is a convex combination of the FLC's output and PID's output by a fuzzy variable, namely, membership function of weighting coefficient. Second, an auto-tuning algorithms utilizing the simplified reasoning method and genetic algorithms is presented to automatically improve the performance of hybrid fuzzy controller. Especially, in order to auto-tune scaling factors and PID parameters of HFC using GA, three kinds of estimation modes such as basic, contraction, and expansion mode are effectively utilized. The proposed HFC is evaluated and discussed to show applicability and superiority with the aid of three representative processes.

Key Words : HFC(Hybrid Fuzzy Controller), GAs(Genetic Algorithms), weighting factor, estimation mode(BM,CM,EM)

1. 서 론

제어기를 설계하는 목적은 제어기를 이용하여 공정의 다양한 동특성을 보완하기 위해서이다. PID 제어기는 설계 및 제어변수 동조의 간편성이 인식되어 많은 분야에서 적용되고 있다[1,2,3,4]. 그러나 이러한 기존의 PID 제어기는 선형 관계가 있는 공정에서조차 제어 환경이나 제어변수의 변화에 매우 민감하고, 또한 복잡하고 비선형적인 공정에 적용시 이의 효율성에 대한 의문이 제기되어 왔다[11]. 반면, 퍼지 제어기는 인간의 경험과 지식에 근간한 언어적 제어규칙을 사용할 수 있으며, 이로 인하여 선형공정 뿐만 아니라 비선형 공정 제어시의 적합함과 우수성이 입증되어 왔다[15,16]. 그러나 퍼지 집합의 조정에 의한 최적 퍼지 규칙을 구성하기 위해, 시행착오를 통한 매우 숙련된 기술이 요구되며 또한 퍼지 제어기의 제어출력은 이를 표현하는 언어적 제어 규칙이 인간의 경험이나 지식을 완벽하게 표현할 수 없는 어려움으로 인해 편향적(biased)이 될 수도 있다[14,16]. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해 가중치에 따라 과도상태에서는 퍼지 제어기를 주로 사용하고 정상상태에서는 PID 제어기를 주로 사용하여 각 제어기의 장점을 부각시킬 수 있는 하이브리드 퍼지 제어기(HFC)의 필요성이 대두되었다[15]. 하이브리드 퍼지 제어기는 기존의 제어기에 비해 정상

및 과도 상태에서의 각 제어출력의 정성적 특성 사이의 상호 깊은 균형으로부터 더 우수한 출력 성능을 보인다. 복잡한 시스템 제어시 어려움 중 하나는 PID 파라미터, 언어적 제어 규칙, 환산계수(scaling factor), 멤버쉽 함수, HFC의 하중계수 등과 같은 많은 제어 파라미터들을 최적으로 선택하는 것이다. 이러한 파라미터들은 제어기의 제어 성능을 향상시키기 위한 중요한 요소이다. 따라서 공정의 최적 응답특성을 얻기 위하여 이 제어 파라미터들을 구하는 새로운 자동 동조 방법의 개발이 요구되어진다.

본 논문에서는, 첫째 하이브리드 퍼지 제어기의 설계방법론을 제안한다. HFC의 시스템에 대한 제어 입력은 퍼지 변수에 의한, PID 제어기 출력과 퍼지 제어기 출력의 컨벡스 결합으로 구성된다. 둘째 릴레이 자동동조방법, Cohen-coon 방법 및 Haalman 방법과 파라미터 추정모드를 기반으로 한 유전자 알고리즘을 이용하여 HFC의 성능을 자동으로 개선시키는 효과적인 자동 동조 알고리즘을 소개한다. 자연 세계의 생물학적 진화과정을 이용하여 만들어진 유전자 알고리즘은 최적화 기법으로 탁월한 성능을 발휘한다. 그러나 이러한 유전자 알고리즘 이용시 무엇보다도 중요한 점은 적절한 유전자 알고리즘의 초기값을 설정하는 것이다. 이 초기값이 적절하지 못할 경우 이는 한정된 영역설정에서 지역극소에 빠지게 되거나 조기 수렴하게 되어 제어기의 성능을 저하시키게 된다[7]. 따라서 본 논문에서는 유전자 알고리즘을 제어기에 적용시 PID 제어기의 파라미터를 구하는 여러 가지 방법, 즉 릴레이 자동동조 방법, Cohen-Coon 방법, Hallman 방법을 이용하여 구해진 파라미터 값을 유전자 알고리즘의 초기값으로 설정한 뒤 이를 기준으로 범위를 구분, 확장하여 최적의 PID 파라미터를 구한다[1]. 그리고 기본, 축소, 확장의 세 가지 추정모드에 의한 자동튜닝 방법으

* 準 會 員 : 圓光大 電氣電子工學部 碩士課程

** 正 會 員 : 圓光大 電氣電子工學部 副教授 · 工博

*** 正 會 員 : 圓光大 電氣電子工學部 教授 · 工博

§ 正 會 員 : 大田大 컴퓨터工學科 助教授 · 工博

接受日字 : 2000年 5月 15日

最終完了 : 2000年 11月 1日

로부터 퍼지 제어기의 환산계수를 구하여 하이브리드 퍼지 제어기의 성능을 개선한다. 또한 이 자동동조 알고리즘 (algorithm)은 제어출력의 제한 조건과 변화율에 따라 PID 파라미터, 환산계수, 언어적 제어 규칙 등의 최적값을 자동으로 추정한다. 이 동조 알고리즘은 퍼지 제어기 및 여러 형태의 하이브리드 퍼지 제어기(FPI+PI, FPI+PID, FPID+PI, FPID+PID) 등에 효과적으로 적용될 수 있다[17]. 본 논문에서 제안된 제어기의 우수성과 적용성을 입증하기 위하여 시간 지연을 가지는 1, 2계 공정 및 DC servo motor에 적용하여 모의 실험을 수행하였으며 제어기의 성능 평가지수로서 ITAE(Integral of the Time multiplied by the Absolute value of Error), 오버슈트(overshoot), 상승시간(rising time)을 사용하였다.

2. 하이브리드 퍼지 제어기의 설계

2.1 하이브리드 퍼지 제어기(HFC)

HFC는 퍼지 제어기와 PID 제어기로 구성되어 있다. 즉, 기존의 PID 제어기와 퍼지 제어기의 장점을 융합한 것으로, 본 논문에서는 유전자 알고리즘을 이용하여 하이브리드 퍼지 제어기의 성능을 개선한다. 시스템에 대한 제어 입력은 퍼지 제어기 및 PID 제어기 출력에 대한 퍼지 변수의 컨베이크 결합으로 각 제어기출력에 하중값을 곱한 합성치를 이용한다. 이의 기본 요소는 PID 파라미터, 환산계수, 언어적 제어 규칙, 그리고 하중계수이다. 그림 1은 HFC의 구성도를 나타낸다.

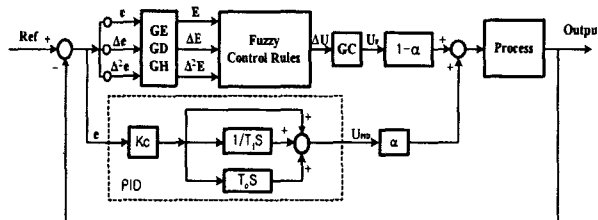


그림 1 하이브리드 퍼지 제어기의 구성도

Fig. 1 The scheme of a hybrid fuzzy controller

여기서, e 는 오차, Δe 는 오차의 변화, $\Delta^2 e$ 는 변동오차의 변화, ΔU 는 제어 출력의 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 PID 제어기의 하중계수, U_{PID} 는 PID 제어기의 제어 출력, U_F 는 퍼지 제어기의 제어 출력, U 는 두 제어출력이 결합된 하이브리드 퍼지 제어기의 제어 출력을 나타낸다.

하이브리드 퍼지 제어기는 PID 제어기와 퍼지 제어기의 효과적인 합성을 위하여 그림 2와 같이 표현되는 하중계수를 이용한다. 설정치와 공정 출력의 절대오차가 크면 α 는 작으므로 퍼지 제어기의 영향이 크고, 그 반대이면 PID 제어기의 영향이 크게된다. 이와 같이 하중계수인 이 가중치로부터 과도상태 부근에서는 퍼지 제어기의 영향이, 정상상

태 부근에서는 PID 제어기의 영향이 보다 강하게 나타난다. 하이브리드 퍼지 제어기는 이 하중계수에 의한 제어 출력 특성의 상호 깊은 균형으로부터 공정 출력성능을 향상시키며, 이 합성 제어 출력은 식 (1)과 같다.

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

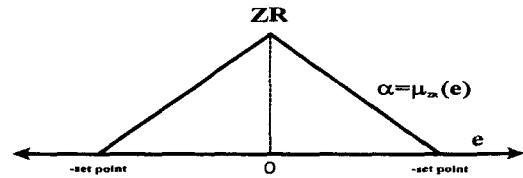


그림 2 하중계수의 멤버십 함수

Fig. 2 Membership function of weighting coefficient

HFC는 식 (2)와 같은 퍼지 논리 규정에 의하여 n 개의 퍼지 제어규칙을 구성한다.

$$R^i: \text{IF } E \text{ is } A_i, \Delta E \text{ is } B_i \text{ and } \Delta^2 E \text{ is } C_i \\ \text{Then } \Delta U \text{ is } D_i \quad (2)$$

여기서,

R^i : i 번째 제어규칙 ($i=1, 2, \dots, n$)

E : 오차, ΔE : 오차의 변화, $\Delta^2 E$: 변동오차의 변화

ΔU : 제어 입력의 변화

A_i, B_i, C_i : 퍼지 변수, D_i : 싱글톤(Singleton)

각각의 규칙에 있어 전반부의 적합도는 식 (3)과 같고, 퍼지 제어기의 비퍼지화 과정을 거친 후반부 추론결과 값은 식 (4)와 같다.

$$w_i = \min\{\mu_{A_i}(E), \mu_{B_i}(\Delta E), \mu_{C_i}(\Delta^2 E)\} \quad (3)$$

$$\Delta U^* = \frac{\sum_{i=1}^n w_i D_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (4)$$

전반부 언어적 제어변수가 오차 (E), 오차의 변화값 (ΔE)일 경우 멤버십 함수는 NB(Negative Big), NM(Negative Middle), NS(Negative Small), ZO(Zero), PS(Positive Small), PM(Positive Middle), PB(Positive Big)의 7개로 구성되고 오차 (E), 오차의 변화값 (ΔE), 변동오차의 변화값 ($\Delta^2 E$)일 경우 멤버십 함수는 N(Negative), Z(Zero), P(Positive)의 3개로 구성되며, 후반부의 제어 출력의 변화값 (ΔU)은 NB(-m3), NM(-m2), NS(-m1), ZO(0), PS(m1), PM(m2), PB(m3) 7개의 싱글톤(singleton) 멤버십 함수를 사용한다.

후반부 멤버십 함수의 초기값 즉, 규칙을 동조하기 전의 멤버십 함수는 $m1=1/3, m2=2/3, m3=1$ 의 값을 가진다. 전체적

인 제어 규칙은 표 1과 같다.

표 1 퍼지 제어규칙

Table 1 Fuzzy control rules

(a) In case of 2-fuzzy variables

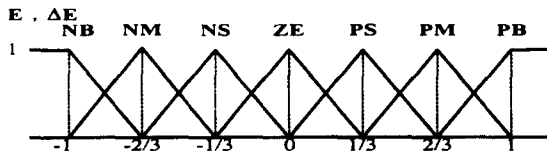
		ΔE						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
E	NB	-m3	-m3	-m3	-m3	-m2	-m1	0
	NM	-m3	-m3	-m3	-m2	-m1	0	m1
	NS	-m3	-m3	-m2	-m1	0	m1	m2
	ZO	-m3	-m2	-m1	0	m1	m2	m3
	PS	-m2	-m1	0	m1	m2	m3	m3
	PM	-m1	0	m1	m2	m3	m3	m3
	PB	0	m1	m2	m3	m3	m3	m3

(b) In case of 3-fuzzy variables

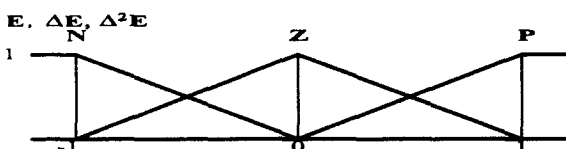
$\Delta^2 E = N$ $\Delta^2 E = Z$ $\Delta^2 E = P$

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

식 (2)의 제어규칙에서 입·출력 변수의 멤버십 함수는 각각 그림 3, 4와 같이 [-1,1]에 의해 표준화된 삼각형 형태와 싱글톤(Singleton)을 사용한다.



(a) In case of E, ΔE



(b) In case of E, ΔE , $\Delta^2 E$

그림 3 전반부 입력변수의 멤버십 함수

Fig. 3 Membership functions of premise input variables

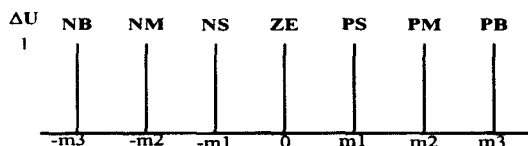


그림 4 후반부 출력변수 ΔU 의 멤버십 함수

Fig. 4 Membership functions of consequence output variable, ΔU

2.2 제어 파라미터 및 퍼지 환산계수 동조를 위한 자동 동조 HFC

그림 5는 유전자 알고리즘을 사용하여 제어 파라미터 및 퍼지 환산계수를 자동 추정하는 하이브리드 퍼지 제어기의 구성도를 나타낸다. 설정치와 공정 출력의 오차를 최소화하기 위한 제어기의 평가함수로 ITAE를 사용한다. 릴레이 자동 동조 방법, Cohen-coon 방법, Haalman 방법을 사용하여 PID 제어기의 파라미터를 구하고 이를 초기값으로 설정한 뒤 유전자 알고리즘을 이용하여 제어 파라미터를 추정한다. 이와 동시에 표준화된 전반부 및 후반부의 멤버십 함수 파라미터 범위로부터 설정된 기본 모드(BM), 축소 모드(CM), 확장 모드(EM)의 세 가지 추정모드를 이용하여 환산계수의 초기값을 설정한 뒤 유전자 알고리즘을 이용하여 환산계수를 추정한다. 이 환산계수와 제어 파라미터가 구해진 뒤 유전자 알고리즘을 재차 이용하여 퍼지 제어 규칙의 후반부 멤버십 함수 파라미터를 동조함으로써 제어기의 성능을 최적으로 개선한다.

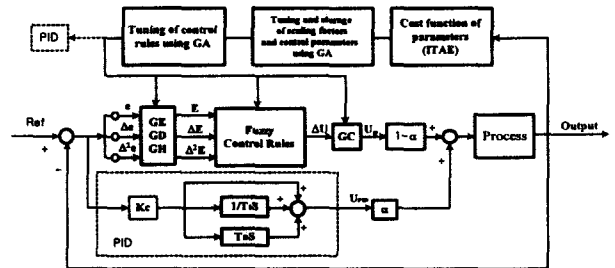


그림 5 환산계수, 제어 파라미터 및 제어규칙 추정을 통한 자동동조 하이브리드 퍼지 제어기의 구성도
Fig. 5 The scheme of auto-tuning hybrid fuzzy controller with estimation of scaling factors, control parameters and control rules

그림 6은 퍼지 및 하이브리드 퍼지 제어기의 설계과정을 나타내며 특히, 이러한 단계적 절차를 통해 하이브리드 퍼지 제어기의 제어성능을 보다 효과적으로 향상시킬 수 있다.

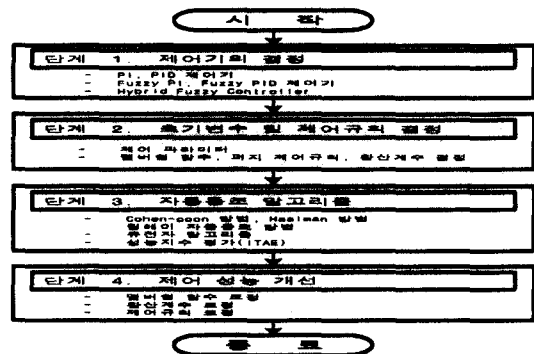


그림 6 퍼지 및 하이브리드 퍼지 제어기를 위한 설계절차의 수행순서

Fig. 6 Flowchart of the design procedure for fuzzy and hybrid fuzzy controller

- (1) PI, PID 제어기
- (2) FPI, FPID 제어기 : Fuzzy PI, Fuzzy PID
- (3) HFC : Fuzzy PI + PI, Fuzzy PI + PID, Fuzzy PID + PI, Fuzzy PID + PID

[단계 2] PID 제어기의 파라미터와 그림 3과 그림 4 및 표 1과 같은 퍼지 제어기의 전·후반부 멤버십 함수 수 및 초기 제어규칙을 결정한다.

[단계 3] 제어 파라미터를 추정하기 위하여 유전자 알고리즘의 초기값(초기영역)을 설정한다.

1. PID 제어기의 파라미터를 위한 초기값 선정은 Cohen-coon 방법, Haalman 방법, 릴레이 동조방법을 사용한다. 각각의 방법에 의해 구해진 값들을 0 %, ±50 %, ±100 %배율로 확장 및 세분화하여 유전자 알고리즘의 초기값(초기영역)으로 사용한다.

2. 퍼지 제어기의 환산계수(GE,GD,GH,GC)의 초기값은 공정 설정치, 공정 편차 및 공정 이득을 이용하여 구한다. 구해진 값들은 BM, CM, EM의 세 모드로 구분하여 유전자 알고리즘의 초기범위로 사용한다. 환산계수 GE,GD,GH는 공정 출력과 설정치와의 오차를 퍼지 규칙의 전반부 소속함수로 표현하기 위한, 즉 [-1,1]의 표준화된 퍼지 값 (E, ΔE, Δ²E)으로 표현하는 수치를 의미한다. 그리고 GC는 퍼지 추론 규칙의 출력을 공정의 차원과 일치시키는 환산계수이다. 따라서 이들 퍼지 환산계수는 일종의 표준화를 위한 계수로서 표현될 수 있다. 퍼지 규칙에 있어 각각의 전·후반부 환산계수의 표현은 식 (5)와 같다. 유전자 알고리즘을 이용하여 환산계수를 동조함에 있어 그림 7과 같이 표현되는 세 가지 모드를 사용한다. CM은 BM을 25% 축소시킨 것이며, EM은 BM을 25% 확장시킨 것이다.

$$E(kT) = \text{error}(kT) \times GE \quad (5.a)$$

$$\Delta E(kT) = [\text{error}(kT) - \text{error}(k-1)T] \times GD \quad (5.b)$$

$$\Delta^2 E(kT) = [\text{error}(kT) - 2\text{error}(k-1)T + \text{error}(k-2)T] \times GH \quad (5.c)$$

$$U(kT) = U(k-1)T + \Delta U(kT) \times GC \quad (5.d)$$

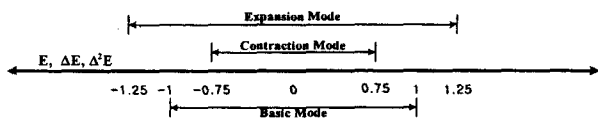


그림 7 환산계수 추정을 위한 세 가지 모드
Fig. 7 Three types of modes for estimation of scaling factors

[단계 4]

하이브리드 퍼지 제어기에서 PID 파라미터와 퍼지 환산계수 GE, GD, GH 및 GC를 유전자 알고리즘을 이용하여

동시에 동조한다. 퍼지 제어규칙의 후반부 멤버십 함수 파라미터 m1, m2, m3를 동조한다.

3. 최적화 자동동조 알고리즘

제어기 설계시 무엇보다도 중요한 것은 제어 파라미터를 최적으로 동조하는 것이다. 설정치와 공정출력치와의 오차를 최소화시키며, 단위 입력에 대한 제어 응답특성을 최적화하기 위하여 ITAE를 유전자 알고리즘의 목적함수로 사용한다[1]. 즉, 유전자 알고리즘을 이용하여 그림 5로 표현되는 HFC의 제어 파라미터(PID 파라미터, 환산계수, 후반부 멤버십 함수 파라미터 등)를 동시에 자동 동조하게 된다. 유전자 알고리즘의 각 세대가 거듭되면서 최적의 ITAE가 구해질 때의 제어 파라미터들은 새로운 PID 파라미터, 환산계수, 후반부 멤버십 함수 파라미터로서 저장된다. 본 논문에서는 유전자 알고리즘의 초기값으로 사용되는 PID 제어기의 파라미터 및 퍼지 제어기의 환산계수를 구하기 위하여 각각 PID 제어기는 Cohen-coon 방법, Haalman 방법 및 릴레이 자동동조 방법을 사용하여 PID 파라미터의 초기값을 구하고 퍼지 제어기는 퍼지 추론과정의 전·후반부 변수의 표준화된 값과 공정 설정치 및 오차를 이용한 세 가지 모드(BM,CM,EM)를 이용하여 각 모드별 환산계수의 초기값을 구한 뒤 유전자 알고리즘을 이용하여 이들 제어 파라미터들을 동시에 추정하였다. 또한 유전자 알고리즘은 제어 출력의 제한 조건과 변화율에 따라 제어 파라미터들의 최적의 값을 자동으로 추정하여 동조한다.

3.1 유전자 알고리즘의 적용

공정을 수행하기 전에 설정해 주어야 하는 여러 종류의 제어 파라미터는 즉, 퍼지 환산계수, 퍼지 제어규칙의 멤버십 함수 파라미터 등이 있다. 이러한 인자들은 제어기의 성능에 민감하게 작용하기 때문에, 이 값들을 최적으로 설정해 주는 것이 제어기의 성능을 향상시키는데 중요한 역할을 한다. 본 논문에서는 이들 제어 파라미터를 최적으로 설정하기 위해 유전자 알고리즘을 이용한다.

유전자 알고리즘은 자연 세계의 진화 과정(유전자적 특성, 적자생존)을 이용한 병렬탐색 알고리즘으로 모든 생물은 주어진 다양한 환경 속에 적응함으로써 살아 남는다는 Darwin의 적자생존의 원리를 이용한 것이다. 이 유전자 알고리즘은 기존의 최적화 방법들과는 달리 선형, 연속, 미분 가능 등의 제한이 없기 때문에 다양한 분야에 별다른 제한 없이 적용될 수 있다는 장점을 가진다. 자연계의 모든 생물은 유전자인 염색체에 의하여 생식과 유전 등 진화과정을 반복·발전해 가는데, 유전 알고리즘은 생물학적 염색체에 해당하는 스트링(string)을 가지고 생물과 같은 유전 연산자인 재생산(reproduction), 교배(crossover), 돌연변이(mutation)를 거쳐서 다음 세대의 자손을 인공적으로 만들어 낸다. 탐색 및 최적화 기법으로 사용되는 유전자 알고리즘은 풀고자 하는 문제에 대한 가능한 해들을 정해진 자료 구조 형태로 표현한 후 이를 유전 연산자를 통해 점차적으로 변형시켜 최적의 해를 구한다. 유전 알고리즘은 파라미터 자체가 아닌 파라미터 집합을 코딩(coding)하고, 탐색공

간에서 단일 해가 아닌 해집합(schema)을 사용한다. 또한 확률적인 규칙을 사용하기 때문에 최적화 문제에서 건설한 전역적 최적의 해를 구할 수 있다. 또한 미분가능성, 연속성 등과 같은 최적화 함수의 정보를 필요로 하지 않고 단지 적합함수(fitness function)값만을 사용한다. 유전자 알고리즘은 겉으로는 임의선택방법의 형태를 띠지만, 이를 바탕으로 근거 있는 다른 정보가공을 통하여 최적지점을 찾아나간다. 최근의 많은 탐색방법들은 한 번에 최적값을 찾아내지 않고, 반복을 통해서 최적지점에 접근해 가는 방법을 사용하고 있다. 유전자 알고리즘도 마찬가지로 적정 수준에 도달할 때까지 탐색과정을 반복한다. 유전자 알고리즘에서 사용하는 수는 기본적인 형태로 실수를 사용하지만 내부적으로 이진 스트링(binary string)을 사용하게 되며, 이진 스트링으로 표현된 변수를 실수 형태로 디코딩하여 사용한다. 변환된 각 비트는 염색체처럼 취급되고, 염색체(chromosome)가 모여 유전자를 이루며 이를 개체(individual)라 한다. 이 개체는 탐색할 때 사용되는 하나의 지점을 의미한다. 동시에 여러 점을 탐색하기 위해 여러 개의 개체를 동시에 사용하는 데 이를 군집이라 한다. 개체에 존재하는 염색체의 수와 군집의 크기는 필요한 정밀도만큼 선정하면 된다. 유전자 알고리즘은 이렇게 생성된 개체들을 모아 하나의 집단을 구성하여 진화를 시킴으로서 최적의 해를 구한다. 선택(selection) 연산은 roulette-wheel 방식, 교배(crossover) 연산은 single point crossover 연산을 사용한다. 그리고 돌연변이 연산은 선택된 비트를 반전시키는 invert 방식을 사용한다. 본 논문에서는 세대는 100세대, 군집은 60개체, 각 파라미터 문자열의 길이를 2진 형태로 10 bit, 교배율은 60%, 돌연변이 발생율은 35%를 사용하였다[6,7]. 그림 8은 유전자 알고리즘의 수행과정을 보인다.

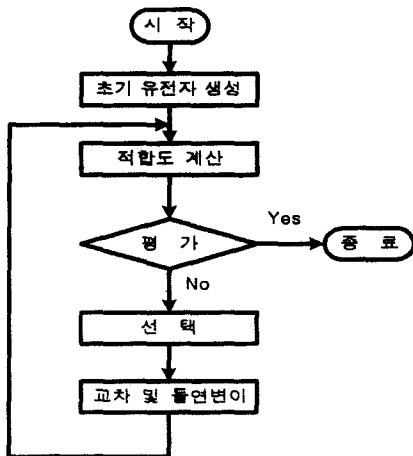


그림 8 유전자 알고리즘의 수행순서
Fig. 8 Flowchart of Genetic Algorithms

유전자 알고리즘은 매우 강력한 비선형 최적화 도구며 적절한 적합도 함수의 선택, 알고리즘과 관련된 각종 매개 변수의 조정 등의 기법을 통해서 그 탐색 성능을 향상시킬 수 있다. 즉, 유전자 알고리즘은 해결하고자 하는 문제에 대해 특별한 제약을 가하지 않으므로 매우 유연한 탐색전략을 수립할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 초기 개체군 구성시

문제가 발생할 경우 한정된 영역 설정에 따른 지역극소에 의한 최적점 선택이 어렵거나 조기 수렴에 빠질 가능성을 배제할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 PID 제어기와 퍼지 제어기가 결합된 하이브리드 퍼지 제어기의 제어 파라미터들을 유전자 알고리즘을 이용하여 동조함에 있어, 먼저 PID 제어기의 파라미터를 구하기 위한 초기 유전자 값을 Cohen-coon 방법, Haalman 방법, 릴레이 동조 방법을 사용하여 구하고 이를 0%, ±50%, ±100% 배율로 확장 및 세분화하여 최적의 파라미터를 구한다. 그리고 퍼지 제어기의 환산계수에 대한 초기 유전자 값은 공정 설정치 및 공정 편차를 이용하여 BM(Basic mode), CM(Contraction mode), EM(Expansion mode)의 세 가지 모드를 설정한 뒤 각 모드별 최적의 파라미터를 추정한다. 또한 하이브리드 제어기 구성시 초기 유전자 값은 PID 제어기의 성능이 우수한 배율의 값과 퍼지 제어기의 세 추정모드를 각각 결합하여 하이브리드 퍼지 제어기의 제어 파라미터를 최적으로 추정한다.

4. 컴퓨터 시뮬레이션 및 결과고찰

식 (6)~(8)은 제안된 하이브리드 퍼지 제어기의 성능과 특성을 평가하기 위하여 적용된 공정의 동적 특성을 전달 함수로 표현한 것이다. 공정 1과 공정 2는 지연 시간(dead time)을 가지는 1계 및 2계 시스템이며 공정 3은 직류 서보 모터(DC servo motor)이다. 이들을 대상으로 하이브리드 퍼지 제어기를 설계하고 각종 제어 파라미터들을 유전자 알고리즘을 이용하여 추정하여 최적의 제어기를 구성한다. 제안된 하이브리드 퍼지 제어기의 성능을 평가하고 기존의 PID 제어기 및 퍼지 제어기와 비교 평가하여 제안된 제어기의 우수성과 유용성을 입증한다.

4.1 공정 1

$$G(s) = \frac{e^{-2s}}{s+1} \tag{6}$$

공정 1은 PID 제어기의 파라미터를 구하는데 있어 Cohen-coon 방법과 릴레이 자동동조 방법을 이용하여 유전자 알고리즘의 초기값을 설정하였다.

표 2는 릴레이 자동동조 방법과 Cohen-coon 방법을 사용하여 PID 제어기의 파라미터를 동조하고 이를 0%, ±50%, ±100% 배율로 확장·세분화하여 유전자 알고리즘의 초기치 범위로 설정한 뒤 유전자 알고리즘을 이용하여 추정한 가장 성능이 우수한 배율에서의 PID 제어기의 파라미터와 제어기의 성능지수를 나타내고 있다.

표 3은 공정 출력과 설정치와의 오차값을 그림 3 및 그림 4와 같은 규준화된 전·후반부 퍼지 변수로 표현하기 위하여 사용되어지는 퍼지 환산계수를 그림 7과 같은 범위 내에서 설정(BM, CM, EM)하여 유전자 알고리즘의 초기값을 선정한 후 환산계수를 추정한 퍼지 PID 제어기의 환산계수와 성능지수 ITAE 및 overshoot를 나타내고 있다. 여기서 GC는 퍼지 제어기의 추론값을 공정의 제어입력으로 변환시키는 환산계수로서 이는 설정치와 공정 이득과 관계되는 값이다. 즉, 제어 입력을 환산하기 위하여 공정 이득과 설정치와

의 관계로부터 GC의 기본범위를 설정하고 이를 배로 증가시켜 가며 구한 것이다.

표 2 유전자 알고리즘을 이용한 PID 제어기 파라미터 및 성능지수

Table 2 PID controller parameters and performance index using GAs

구분	초기치	배율	동조치	ITAE	Overshoot(%)
Relay method	K	0.793	0%	0.484	78.942
	T _i	4.0		1.887	
	T _d	1.0		0.498	
C-C method	K	0.914	± 50 %	0.512	78.214
	T _i	3.035		1.958	
	T _d	0.533		0.540	

표 3 유전자 알고리즘을 이용하여 동조한 퍼지 PID 제어기의 환산계수 및 성능지수

Table 3 The scaling factors and performance index of Fuzzy PID controller using GAs

	BM	CM	EM	
환산 계수	GE	0.0097	0.0073	0.0141
	GD	0.0669	0.0502	0.0923
	GH	0.0724	0.0543	0.1054
GC	20.2639(<300%)	27.0185(<400%)	14.9560(<200%)	
ITAE	80.9451	80.8671	83.4057	
Overshoot	2.91 %	3.55 %	5.93 %	

표 4 하이브리드 퍼지 제어기의 제어파라미터 및 성능지수

Table 4 The control parameters and performance index of hybrid fuzzy controller

(a) In case of relay tuning method

MODE	FPI-PI			FPI-PID			FPID-PI			FPID-PID			
	BM	CM	EM	BM	CM	EM	BM	CM	EM	BM	CM	EM	
퍼지 환산 계수	GE	0.010	0.013	0.010	0.008	0.004	0.006	0.009	0.0070	0.009	0.009	0.008	
	GD	0.051	0.070	0.040	0.058	0.033	0.034	0.072	0.0480	0.109	0.068	0.067	
	GH							0.091	0.0614	0.069	0.076	0.052	
	GC	9.442	8.035	10.029	10.615	21.466	19.384	19.354	25.718	17.448	20.410	19.061	18.651
PID 파라미터	배율	0 %			0 %			0 %			0 %		
	K	0.132	0.157	0.074	0.1915	0.267	0.415	0.356	0.3332	0.192	0.376	0.542	0.246
	T _i	1.348	1.773	1.916	1.384	1.775	2.103	1.1339	1.3490	0.736	1.943	1.904	1.047
	T _d				0.908	0.851	0.631				0.510	0.523	0.471
ITAE	93.823	90.914	103.65	96.675	78.530	90.043	97.892	91.329	87.458	78.129	85.818	68.528	
상승시간(%)	3.38	6.63	1.13	4.08	8.31	10.48	3.26	2.49	3.14%	3.21	1.73	5.89	

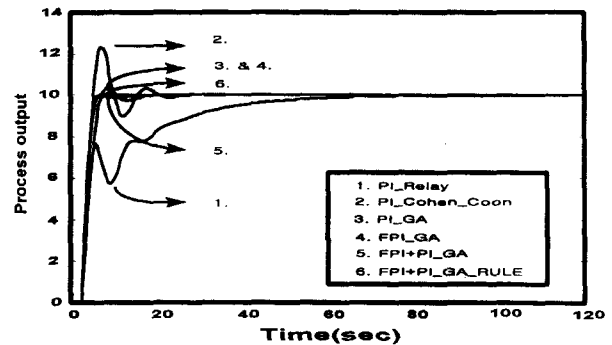
(b) In case of Cohen-coon method

MODE	FPI-PI			FPI-PID			FPID-PI			FPID-PID			
	BM	CM	EM	BM	CM	EM	BM	CM	EM	BM	CM	EM	
퍼지 환산 계수	GE	0.009	0.007	0.008	0.019	0.018	0.006	0.008	0.006	0.013	0.010	0.009	
	GD	0.076	0.048	0.065	0.088	0.072	0.049	0.074	0.064	0.092	0.069	0.072	
	GH							0.061	0.059	0.120	0.052	0.038	
	GC	8.827	13.431	9.853	5.601	6.363	13.548	20.263	23.753	14.252	19.618	20.351	23.460
PID 파라미터	배율	± 50 %			± 50 %			± 50 %			± 50 %		
	K	0.183	0.114	0.053	0.704	0.663	0.552	0.098	0.076	0.239	0.485	0.634	0.518
	T _i	0.755	1.388	0.371	1.749	1.847	1.868	1.663	0.792	1.461	3.990	2.073	2.548
	T _d				0.613	0.615	0.566				0.793	0.447	0.610
ITAE	94.503	84.947	84.356	98.691	100.99	100.03	83.461	94.891	86.601	90.879	102.1	87.209	
상승시간(%)	0.98	8.43	0.04	3.36	7.92	5.83	1.6	0.00	1.68	3.28	5.98	6.77	

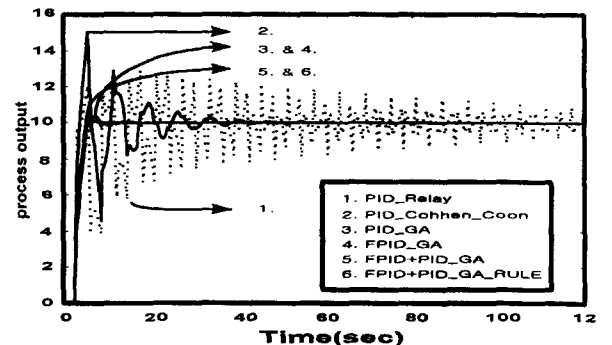
표 4의 (a)와 (b)는 수식 (6)으로 표현되는 공정 1을 유전자 알고리즘으로 동조한 하이브리드 퍼지 제어기의 퍼지 환산계수와 PID 파라미터값 및 각 제어기의 성능지수를 나타내고 있다. PID 파라미터를 (a)는 릴레이 동조 방법에 의한 초기치를 이용하여 자동동조 하였고 (b)는 Cohen-coon 방법을 사용한 것이다. PID 제어기와 퍼지 제어기 합성에 의한 하이브리드 퍼지 제어기의 경우에 퍼지 제어기의 초기 유전자 값은 세 가지 모드(BM,CM,EM)로 세분하고, PI 혹은 PID 제어기의 초기 유전자 값은 각각 단독의 PI 및 PID 제어기 적용시 제어성능이 가장 우수한 배율의 파라미터값을 유전자 알고리즘의 초기치 및 초기범위로 하여 제어 파라미터드들을 동시에 자동튜닝한 여러 형태의 하이브리드 퍼지 제어기를 나타낸다. 표 4에서 하이브리드 퍼지 제어기는 퍼지 제어기 및 PID 제어기가 단독으로 사용될 경우 보다 성능지수가 개선됨을 알 수 있다.

그림 9의 (a)는 릴레이 동조 방법(1)과 Cohen-coon 방법(2)에 의해 동조된 PI 제어기, 유전자 알고리즘에 의해 동조된 PI 제어기(3), 퍼지 PI 제어기(4), 하이브리드 퍼지 제어기(FPI+PI)(5) 및 퍼지 규칙의 후반부 멤버십을 동조한 하이브리드 퍼지 제어기(6)의 응답결과를 보인 것이다.

그림 9의 (b)는 릴레이 동조 방법(1)과 Cohen-coon 방법(2)에 의해 동조된 PID 제어기, 유전자 알고리즘에 의해 동조된 PID 제어기(3), 퍼지 PID 제어기(4), 하이브리드 퍼지 제어기(FPID+PID)(5) 및 퍼지 규칙의 후반부 멤버십을 동조한 하이브리드 퍼지 제어기(6)의 응답 결과를 보인 것이다.



(a)



(b)

그림 9 각 제어기들의 자동튜닝된 응답

Fig. 9 The auto-tuned responses of each controller

그림 10은 하이브리드 퍼지 제어기(FPID+PID)의 제어 입

력, PID 제어기 및 퍼지 제어기의 제어 입력 그리고 PID 제어기 및 퍼지 제어기의 하중계수에 의한 가중치를 나타낸다. 그림과 같이 과도 상태에서는 퍼지 제어기의 가중치가 정상 상태에서는 PID 제어기의 가중치가 높음을 알 수 있다. 이는 단위계단응답에 있어 멤버십 함수에 의한 그림 2로 표현되는 가중치에 따라 과도상태에서는 퍼지 제어기가 보다 활성화되고 정상상태에서는 PID 제어기가 보다 활성화되어 각각의 제어기의 장점을 최대한 활용하여 하이브리드 퍼지 제어기의 응답특성을 개선함을 알 수 있다.

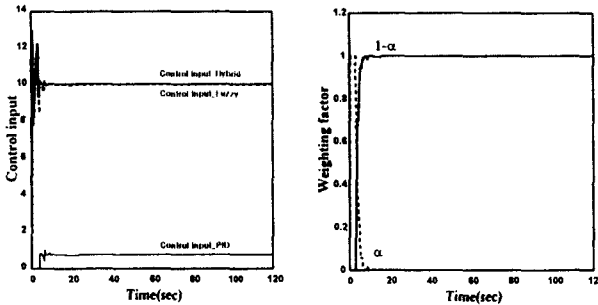


그림 10 하이브리드 퍼지 제어기의 제어 입력과 하중계수의 효과
Fig. 10 The control input of hybrid fuzzy controller and the effect of weighting factor

그림 11은 하이브리드 퍼지 제어기(FPID+PID)의 제어 성능을 향상시키기 위하여 표 1과 그림 4로 표현되는 제어규칙의 후반부 파라미터를 동조한 결과를 나타내고 있다. 그림과 같이 제어 규칙의 후반부 파라미터를 동조함으로써 제안된 하이브리드 퍼지 제어기의 제어 성능을 더욱 개선시킬 수 있다.

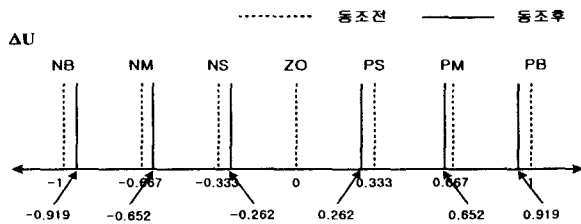


그림 11 퍼지 제어규칙의 후반부 파라미터 자동동조
Fig. 11 Auto-tuning of consequence membership parameter in control rule

표 5는 유전자 알고리즘에 의해 동조된 PID 제어기, 퍼지 제어기, 하이브리드 퍼지 제어기 및 제어 규칙의 후반부 파라미터를 동조한 하이브리드 퍼지 제어기의 성능 지수와 특성을 비교한 것이다. 제안된 하이브리드 퍼지 제어기가 기존의 PID 제어기, 퍼지 제어기보다 일반적으로 우수한 제어 특성을 가지며, 이들 제어특성인 성능지수 ITAE, 오버슈트, 상승시간 등을 상호 고려하여 최적의 제어기를 설계할 수 있다. 특히 공정 1에서는 FPI+PI(rule 동조) 및 FPI+PID(rule 동조) 형태의 하이브리드 퍼지 제어기가 모든 제어특성을 고려한 최적 제어기임을 알 수 있다.

표 5 각 제어기의 성능비교

Table 5 The performance comparison for each controller

	PI	FPI	FPI+PI	FPI+PI (rule)	PID	FPID	FPID +PI	FPID +PID	FPID +PID (rule)
ITAE	123.011	123.167	84.356	72.755	78.214	80.867	94.891	68.528	64.914
오버슈트	3.64 %	3.33 %	0.04 %	0.06 %	3.48 %	3.55 %	0 %	5.89 %	6.96 %
상승시간	3.26	3.34	2.47	2.44	2.37	2.37	2.20	2.18	2.08

4.2 공정 2

$$G(s) = \frac{e^{-0.8s}}{(s+1)(s+2)} \quad (7)$$

공정 2는 PID 제어기의 파라미터를 구하는데 있어 Haalman 방법과 릴레이 자동동조 방법을 이용하여 유전자 알고리즘의 초기값을 설정하였다.

표 6은 Haalman 방법과 릴레이 자동 동조 방법을 사용하여 PID 제어기의 파라미터를 동조하고 이를 기반으로 0 %, ±50 %, ±100 % 배율로 확장·세분화하여 유전자 알고리즘의 초기치 범위로 설정한 뒤 유전자 알고리즘을 이용하여 추정된 가장 성능이 우수한 배율에서의 PID 제어기의 파라미터와 제어기의 성능지수를 나타내고 있다.

표 7은 공정 출력과 설정치와의 오차값을 그림 3 및 그림 4와 같은 표준화된 전·후반부 퍼지 변수로 표현하기 위하여 사용되어지는 퍼지 환산계수를 그림 7과 같은 범위 내에서 설정(BM, CM, EM)하여 유전자 알고리즘의 초기값을 설정한 후 환산계수를 추정된 퍼지 PID 제어기의 환산계수와 성능지수 ITAE 및 overshoot를 나타내고 있다. 또한 GC는 공정 1에서와 마찬가지로 퍼지 제어기의 추론값을 공정의 제어입력으로 변환시키는 환산계수로서 이는 설정치와 공정 이득과 관계되는 값이다. 따라서 설정치와 공정이득과의 관계로부터 GC의 기본범위를 설정하고 이를 배로 증가시켜 가며 구한 것이다.

표 6 유전자 알고리즘을 이용한 PID 제어기 파라미터 및 성능지수

Table 6 PID controller parameters and performance index using GAs

	구분	초기치	배율	동조치	ITAE	overshoot(%)
Relay method	K	2.081	0 %	1.327	37.276	1.59
	T _i	3.25		1.784		
	T _d	0.813		0.479		
Haalman method	K	2.5	±50 %	1.345	36.924	3.12
	T _i	1.5		1.758		
	T _d	0.333		0.486		

표 8 (a)와 (b)는 수식 (7)로 표현되는 공정 2를 유전자 알고리즘으로 동조한 하이브리드 퍼지 제어기의 각 모드의 퍼지 환산계수와 PID 파라미터값 및 각 제어기의 성능지수를 나타내고 있다. PID 파라미터를 (a)는 릴레이 동조 방법에 의한 초기치를 이용하여 자동동조 하였고 (b)는 Haalman 방법을 사용한 것이다. 하이브리드 퍼지 제어기의 경우에 퍼지 제어기의 초기 유전자 값은 세 가지 모드(BM,CM,EM)로 세분하고, PI 혹은 PID 제어기의 초기 유전

자 값은 각각 단독의 PI 및 PID 제어기 적용시 제어성능이 우수한 배율의 값을 유전자 알고리즘의 초기치 및 초기범위로 하여 제어 파라미터를 동시에 자동튜닝한 여러 형태의 하이브리드 퍼지 제어기를 나타낸다. 표 8에서 제안된 하이브리드 퍼지 제어기가 PID 제어기 및 퍼지 제어기 보다 일반적으로 제어성능 ITAE가 우수하고 또한 공정이 요구하는 제어성능에 따라 오버슈트나 ITAE가 우수한 하이브리드 퍼지 제어기를 설계할 수 있다.

표 7 유전자 알고리즘을 이용하여 동조한 퍼지 PID 제어기의 환산계수 및 성능지수

Table 7 The scaling factors and performance index of Fuzzy PID controller using GAs

		BM	CM	EM
환산 계수	GE	0.0141	0.0111	0.0103
	GD	0.0852	0.0641	0.0607
	GH	0.0946	0.0694	0.0677
	GC	42.2287(<300%)	53.7830(<200%)	57.3607(<300%)
	ITAE	38.3549	37.8296	37.1073
오버슈트		1.02 %	3.98 %	2.77 %

표 8 하이브리드 퍼지 제어기의 제어파라미터 및 성능지수

Table 8 Control parameters and performance of hybrid fuzzy controller

(a) In case of relay tuning method

MODE	FPI+PI			FPI+PID			FPID+PI			FPID+PID			
	B.M	C.M	E.M	B.M	C.M	E.M	B.M	C.M	E.M	B.M	C.M	E.M	
퍼지 환산 계수	GE	0.014	0.006	0.009	0.007	0.008	0.010	0.009	0.010	0.021	0.009	0.009	0.008
	GD	0.097	0.070	0.050	0.029	0.072	0.073	0.056	0.050	0.109	0.068	0.067	0.099
	GH							0.074	0.033	0.081	0.076	0.052	0.109
	GC	20.821	30.381	27.605	39.530	24.574	22.756	58.295	52.492	27.741	58.533	54.959	55.483
배율		0 %			0 %			0 %			0 %		
PID 파라 메터	K	0.534	0.251	0.382	0.885	0.563	0.646	0.602	0.528	0.706	0.910	0.777	0.629
	T _i	8.497	0.986	2.546	2.763	1.556	1.623	0.824	2.899	2.194	1.943	2.198	0.875
	T _d				0.488	0.751	0.432				0.667	0.336	0.671
	ITAE	55.358	51.795	51.803	46.848	39.353	44.339	54.499	54.076	54.963	36.206	44.352	34.921
Over shoot(%)		16.69	14.92	6.06	3.02	2.39	5.67	4.55	3.45	5.54	8.16	2.36	4.72

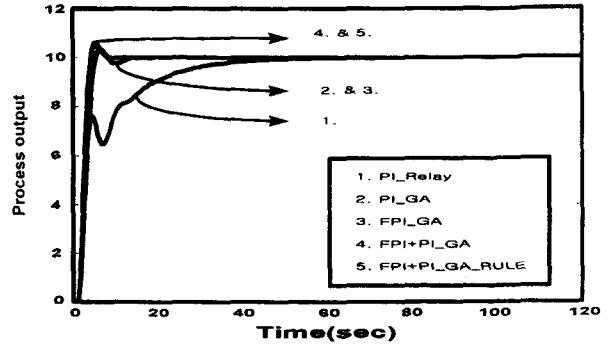
(b) In case of Haalman method

MODE	FPI+PID			FPID+PID			
	B.M	C.M	E.M	B.M	C.M	E.M	
퍼지 환산 계수	GE	0.011	0.007	0.018	0.018	0.009	
	GD	0.073	0.058	0.092	0.065	0.051	
	GH				0.055	0.065	
	GC	22.052	29.501	15.874	51.378	56.891	
배율		± 50 %			± 50 %		
PID 파라 메터	K	0.704	0.621	1.015	1.089	1.052	
	T _i	2.442	2.750	2.483	2.469	1.631	
	T _d	0.601	0.624	0.589	0.484	0.293	
	ITAE	42.304	39.894	45.859	41.239	41.952	
Over shoot(%)		4.50	6.72	2.97	1.66	0.01	

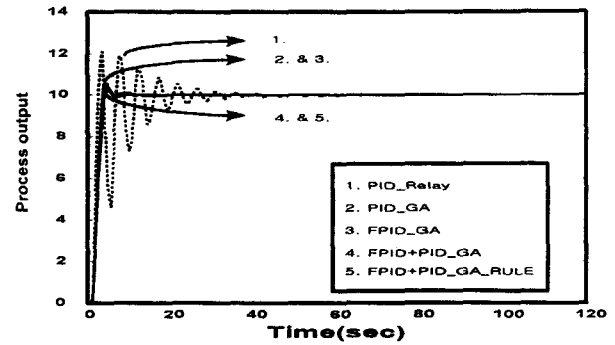
그림 12 (a)는 릴레이 동조 방법에 의해 동조된 PI 제어

기(1), 유전자 알고리즘에 의해 동조된 PI 제어기(2), 퍼지 PI 제어기(3), 하이브리드 퍼지 제어기(FPI+PI)(4) 및 퍼지 규칙을 동조한 하이브리드 퍼지 제어기(5)의 응답결과를 보인 것이다.

그림 12 (b)는 릴레이 동조 방법에 의해 동조된 PID 제어기(1), 유전자 알고리즘에 의해 동조된 PID 제어기(2), 퍼지 PID 제어기(3), 하이브리드 퍼지 제어기(FPID+PID)(4) 및 퍼지 규칙을 동조한 하이브리드 퍼지 제어기(5)의 응답결과를 보인 것이다.



(a)



(b)

그림 12 각 제어기의 자동튜닝된 응답
Fig. 12 The auto-tuned response of each controller

그림 13은 하이브리드 퍼지 제어기(FPID+PID)의 제어 입력, PID 및 퍼지 제어기의 제어 입력 그리고 PID 및 퍼지 제어기의 하중계수에 의한 가중치를 나타낸다. 그림과 같이 과도 상태에서는 퍼지 제어기의 가중치가 높고 정상 상태에서는 PID 제어기의 가중치가 높음을 알 수 있다. 이는 과도 상태에서는 퍼지 제어기가 정상상태에서는 PID 제어기가 보다 활성화되어 각 제어기의 응답특성을 개선하며 각각의 PID 제어기와 퍼지 제어기의 제어출력의 상호 깊은 융합으로부터 하이브리드 퍼지 제어기의 제어입력이 구성되고 이로부터 최적의 응답특성을 얻을 수 있다.

그림 14는 하이브리드 퍼지 제어기(FPID+PID)의 제어 성능을 향상시키기 위하여 표 1과 그림 4로 표현되는 제어규칙의 후반부 파라미터를 동조한 결과를 나타내고 있다. 그림과 같이 제어 규칙의 후반부 파라미터를 유전자 알고리즘을 이용하여 동조함으로써 제안된 하이브리드 퍼지 제어기의 제어 성능이 더욱 개선시킴을 표 9의 결과로 알 수 있다.

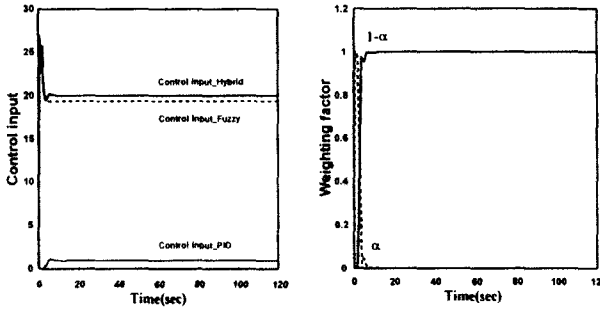


그림 13 하이브리드 퍼지 제어기의 제어 입력과 하중계수의 효과

Fig. 13 The control input of hybrid fuzzy controller and the effect of weighting factor

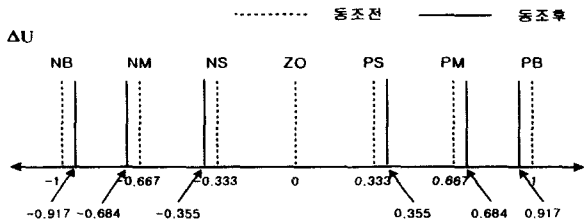


그림 14 퍼지 제어규칙의 후반부 파라미터 동조
Fig. 14 Auto-tuning of consequence membership parameters in control rule

표 9는 유전자 알고리즘에 의해 동조된 PID 제어기, 퍼지 제어기, 하이브리드 퍼지 제어기 및 퍼지 제어 규칙을 동조한 하이브리드 퍼지 제어기의 성능 지수와 특성을 비교한 것이다. 표에서 알 수 있듯이 하이브리드 퍼지 제어기가 기존의 PID 제어기, 퍼지 제어기보다 우수한 제어특성을 가지며, 이들 제어특성을 상호 고려하여 설계된 제어기로는 FPID+PID(Haalman) 및 이의 제어규칙을 동조한 형태의 하이브리드 제어기가 최적의 제어기임을 알 수 있다.

표 9 각 제어기의 성능비교

Table 9 The performance comparison of each controller

	PI	FPI	FPF+PI	FPF+PID	FPF+PI (rule동조)	PID	FPID	FPID+PID (Relay)	FPID+PID (Haalman)	FPID+PID (rule동조)
ITAE	68.51	68.59	51.803	39.35	45.745	36.925	37.103	34.921	37.331	33.031
오버슈트 %	3.00 %	3.34 %	5.06 %	2.39 %	5.49 %	3.12 %	2.77 %	4.72 %	1.28 %	5.81 %
상승시간	2.82	2.82	2.05	1.85	2.05	1.80	1.85	1.66	1.67	1.59

4.3 공정 3

$$\frac{Q(s)}{V_i(s)} = \frac{K_t}{JL_a s^2 + (JR_a + L_a B)s + K_t K_e + R_a B} \quad (8)$$

제안된 제어기의 성능을 평가하기 위하여 DC servo motor(Electro-Craft Model E-576 Servo motor)의 속도제

어에 적용하여 유용성과 적용성을 입증한다[5].

직류서보 전동기 실험에서 sampling time은 0.01(sec.) 설정치를 정격 3000 RPM으로 설정하였으며, 제어대상에 대하여 제어입력의 급격한 변화 및 조작량은 직류서보 전동기의 수명을 단축시키므로 조작신호에 상·하한 제한을 두어 직류서보 전동기의 제약조건을 설정하였다[5].

사용된 모터의 정격은 아래와 같다.

$$V_i(\max) = 30 [V], I_a(\max) = 2 [A], R_a = 3 [\Omega],$$

$$L_a = 6 \times 10^{-3} [H], K_t = 50 \times 10^{-3} [N\text{-mr}/A],$$

$$T = 0.1 [N\text{-m}], J = 100 [\mu\text{kgm}^2], B = 100 [\mu\text{kgm}^2]$$

$$\text{RPM}(\text{rated}) = 3000 \text{ rpm}$$

표 10은 릴레이 동조 방법에 의해 구해진 PID 파라미터를 0 %, ±50 %, ±100 %의 배율로 확장·세분화하여 이를 유전자 알고리즘의 초기값으로 설정한 뒤 자동 동조한 가장 성능이 우수한 배율의 PID 제어기 파라미터와 제어기의 성능을 나타내고 있다.

표 10 유전자 알고리즘을 이용한 PID 제어기의 제어 파라미터 및 성능지수

Table 10 The controller parameters and performance index of PID controller using GAs

	구분	초기치	배율	동조치	ITAE	overshoot (%)
Relay method	K	0.05071	0 (%)	0.0226	8.5568	1.10
	T _i	0.12		0.0431		
	T _d	0.03		0.0003		

표 11은 환산계수를 그림 7과 같은 세 가지 모드(BM,CM,EM)를 적용하여 초기값을 선정한 후 유전자 알고리즘으로 동조한 퍼지 PID 제어기의 동조된 퍼지 환산계수와 퍼지 제어기의 성능지수 ITAE 및 overshoot를 나타낸다.

표 11 유전자 알고리즘을 이용하여 동조한 퍼지 PID 제어기의 환산계수 및 성능지수

Table 11 The scaling factors and performance index of Fuzzy PID controller using GAs

		Basic Mode	Contraction Mode	Expansion Mode
환산계수	GE	0.000035	0.000034	0.000054
	GD	0.000256	0.000244	0.000330
	GH	0.000161	0.000047	0.000003
	GC	425.220123	336.910065	281.424896
ITAE		9.3368	8.9536	8.4753
오버슈트		0.42 %	0.08 %	1.17 %

표 12는 유전자 알고리즘을 이용한 하이브리드 퍼지 제어기(FPID+PID)를 모터에 적용시 자동 동조된 PID 파라미터와 환산계수 및 하이브리드 퍼지 제어기의 성능을 나타내고

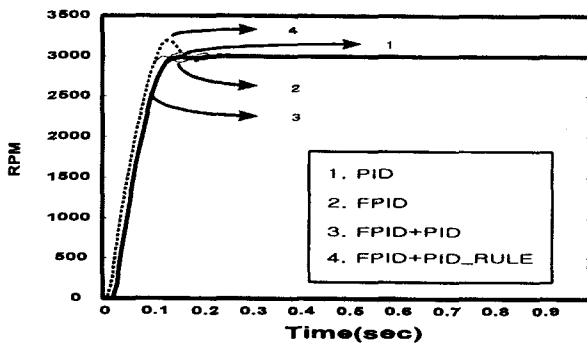
있다. 하이브리드 제어기가 PID 및 퍼지 제어기보다 오버슈트가 없이 수렴함을 알 수 있다.

표 12 하이브리드 퍼지 제어기의 제어파라미터 및 성능지수

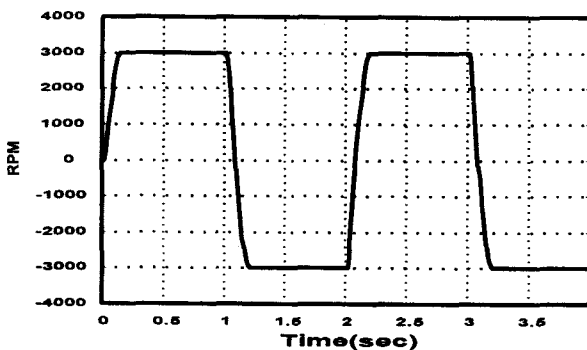
Table 12 Control parameters and performance of hybrid fuzzy controller

MODE		FPID+PID		
		B.M	C.M	E.M
환산 계수	GE	0.034115	0.003812	0.098118
	GD	0.079961	0.001393	0.109604
	GII	0.043206	0.017889	0.058529
	GC	6.998132	114.969307	98.973579
PID 파라미터	배율	0 %		
	K	0.025087	0.028458	0.025533
	T _i	0.045285	0.057249	0.064990
	T _d	0.000157	0.001300	0.000362
ITAE		8.6582	9.3763	9.2187
오버슈트		0.04 %	0.62 %	0.00%

그림 15 (a)는 DC servo 모터의 속도제어에 적용된 유전자 알고리즘을 이용한 각 제어기들의 성능을 비교 평가한 것이며 그림 15 (b)는 모터의 정·역회전시의 제어 성능을 나타낸 것이다.



(a)



(b)

그림 15 자동튜닝된 각 제어기의 응답 및 HFC의 응답
Fig. 15 The auto-tuned response of each controller and response of HFC

표 13은 DC servo 모터의 속도 제어에 적용된 유전자 알고리즘을 이용하여 동조한 각 제어기의 성능을 비교 평가한 것으로 하이브리드 퍼지 제어기가 기존의 PID나 퍼지 제어기보다 성능이 ITAE 측면에서는 별 차이가 없으나 오버슈트의 성능 개선측면에서는 우수함을 나타낸다.

표 13 성능지수 비교평가

Table 13 Comparison with performance in each controller

	PID	FPID	FPID+PID
ITAE	8.5568	8.4753	8.6582
오버슈트(%)	1.10	1.17	0.04
상승시간(sec.)	0.106	0.075	0.107

5. 결 론

본 논문에서 PID 제어기와 퍼지 제어기가 결합된 하이브리드 퍼지 제어기의 설계방법과 유전자 알고리즘을 이용한 하이브리드 퍼지 제어기의 최적 제어파라미터 추정방법을 제안하였다.

첫째, 퍼지변수로 표현되는 하중계수의 멤버십 함수를 이용하여 PID 제어기의 장점과 퍼지 제어기의 장점을 최대한 활용하도록 제어입력을 구성한 하이브리드 퍼지 제어기를 사용함으로써 적용 시스템에 따라 제어기의 성능을 최적으로 향상시킨다

둘째, PID 제어기와 퍼지 제어기가 결합된 하이브리드 퍼지 제어기의 제어 파라미터들을 유전자 알고리즘을 이용하여 동시에 추정함에 있어 PID 제어기의 파라미터를 구하는 릴레이 동조 방법, Cohen-coon 방법, Haalman 방법을 사용하고 퍼지 제어기의 환산계수를 구하기 위하여 환산계수 추정모드를 이용한다. 즉, 기존의 PID 제어기의 파라미터를 구하는 각각의 방법에 의한 값들을 유전자 알고리즘의 초기값으로 사용하여 0 %, ±50 %, ±100 % 배율로 확장 및 세분화한 범위로부터 PID 파라미터를 동조하고 퍼지 제어기의 환산계수를 구하기 위하여 공정 설정치, 오차 및 공정이득으로부터 BM, CM, EM의 세 가지 추정모드를 설정하고 이를 이용한 유전자 알고리즘의 초기치 범위에 의해 환산계수를 자동 동조하여 하이브리드 퍼지 제어기의 제어성능을 향상시킨다.

셋째로, 공정특성 및 설계자의 의도에 따라 하이브리드 퍼지 제어기의 제어규칙을 동조함으로써 이의 성능을 향상시킬 수 있다. 하이브리드 퍼지 제어기는 FPI+PI, FPI+PID, FPID+PI, FPID+PID형태의 경우를 고려한다.

감사의 글

본 연구는 2000년도 원광대학교 교비지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

[1] K.Astrom and T. Hagglund, "PID Controller : Theory, Design and Tuning." Instrument Society of America, 1995.

[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 Åström K.J, "Refinements of the Ziegler Nichols tuning formula for PID auto-tuners." Proc. ISA Conf., USA.

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

[5] Benjamin C.Kuo, Jacob Tal, "DC motors and Control systems." SRL Pub. Co., 1978.

[6] Zbigniew Michalewicz, "Genetic algorithms + Data Structures = Evolution programs." Springer verlag, 1992.

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

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

[9] T.j.Procyk and E.H.Mamdani, "A linguistic synthesis of fuzzy controller." Automatica, vol.15,pp.15-30, 1979.

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

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

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

[13] L.A.Zadeh, "Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision process." IEEE Trans. on System. Man and Cybernetics., pp.28-44, 1973.

[14] J.Malers and Y.S.Sherif, "Application of fuzzy set theory." IEEE Trans. on System, Man and Cybernetics., vol. Smc-15,no.1, 1985.

[15] Sungkwun Oh, Taechon Ahn, Hyungsoo Hwang, Jongjin Park and Kwangbang 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.

[16] Kevin M. Passino and Stephen yurhovich, "Fuzzy Control." Addison Wesley Longman, Inc, 1998.

[17] Ziegler, J.G, and Nichols, N.B, "Optimum settings for automatic controllers." Trans. ASME, 65, pp.433-444, 1942.

저 자 소 개



이 대 근 (李大根)

1973년 11월 30일생. 1996년 원광대 제어계측공학과 졸업. 1999년~현재 동 대학원 제어계측공학과 석사과정
E-mai:
lemon38@gaebyok.wonkwang.ac.kr



장 성 환 (張成煥)

1950년 6월 25일생. 1974년 홍익대 전기공학과 졸업. 1982년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1980-현재 원광대 전기공학과 교수



오 성 권 (吳聖權)

1957년 2월 13일생. 1981년 연세대 전기공학과 졸업. 1983-89년 금성산전연구소(선임연구원). 1993년 연세대 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1993-현재 원광대 제어계측공학과 부교수

Tel : 063-850-6342, Fax : 063-853-2196
E-mail : ohsk@wonms.wonkwang.ac.kr



김 용 수 (金龍洙)

1959년 1월 16일생. 1981년 연세대 전기공학과 졸업. 1983년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1983- 1986년 삼성전자 연구소. 1993년 Dept. of Electrical Eng., Texas Tech University (공학). 1995년-현재 대전대학교 컴퓨터공학과 조교수.