

## 제어파라미터 추정모드기반 GA를 이용한 HFC

이대근, 오설권, 장성환  
원광대학교 전자전자 공학부

## Hybrid Fuzzy Controller Using GAs Based on Control parameters Estimation mode

Dae-Keun Lee, Sung-Kwon Oh and Sung-Whan Jang  
School of Electrical and Electronic Engineering, Wonkwang Univ., Iksan, KOREA

**Abstract** - The new design methodology of a hybrid fuzzy controller by means of the genetic algorithms is presented. In fuzzy controller which has been widely applied and used, in order to construct the best fuzzy rules that include adjustment of fuzzy sets, a highly skilled techniques using trial and error are required. To deal with such a problem, first, a hybrid fuzzy controller(HFC) related to the optimal estimation of control parameters is proposed. The HFC combined a PID controller with a fuzzy controller concurrently produces the better output performance than any other controller from each control output in steady state and transient state. Second, a auto-tuning algorithms is presented to automatically improve the performance of hybrid fuzzy controller, utilizing the simplified reasoning method and genetic algorithms. In addition, to obtain 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 HFCs are applied to the first-order, second-order process with time-delay and DC motor. Computer simulations are conducted at step input and the performances of systems are evaluated and also discussed from performance indices.

## 1. 서 론

기존의 PID 제어기는 복잡하고 비선형적인 공정에 적용 시 과도상태에서 이의 적용 효율성에 대한 의문이 제기되어 왔다[1]. 반면, 퍼지 제어기는 인간의 경험과 지식에 근간한 언어적 제어규칙을 사용 할 수 있어 비선형 공정 제어시의 적합함과 우수성이 입증되어 왔다. 퍼지 이론을 이용한 제어 시스템은 전문가의 지식을 직접 시스템 설계에 이용할 수 있어 기존의 PID 제어기에 비해 고차 시스템, 비선형 동적 시스템, 수학적 모델을 얻기 어려운 시스템 제어시 강연함이 입증되어 왔다. 본 논문에서는 첫째 하중계수인 멤버쉽 함수를 이용하여 퍼지 제어기와 PID 제어기의 출력을 컨벡스 결합하여 퍼지 제어기와 PID 제어기의 장점을 융합한 하이브리드 퍼지 제어기(Hybrid Fuzzy Controller)의 설계방법을 제안한다[3]. 둘째 기본, 축소, 확장의 세 가지 파라미터 추정모드를 토대로 효율적으로 초기값을 선정한 유전자 알고리즘을 이용하여 하이브리드 퍼지 제어기의 환산계수와 PID 파라미터 등의 제어 파라미터를 자동으로 추정함으로서 하이브리드 퍼지 제어기의 성능을 개선한다. 이는 유전자 알고리즘의 부적절한 초기값 선정시 한정된 영역설정에 따른 지역극소 또는 조기 수렴으로 인한 제어기의 성능저하를 개선한다[3].

나아가 본 논문에서 제안된 제어기의 우수성과 적용성을 입증하기 위하여 시간지연을 가지는 1계 및 2계 공정과 DC motor에 적용하여 모의 실험을 수행하였으며 제어기의 성능평가지수로서 ITAE(Integral of the Time multiplied by the Absolute value of Error), 오버슈트, 상승시간을 사용하였다.

## 2. 본 론

## 2.1 Hybrid Fuzzy Controller

HFC는 기존의 PID 제어기의 장점과 퍼지 제어기의 장점을 최재로 활용하기 위하여 멤버쉽 함수로 표현되는 하중계수에 의해 이를 제어기의 장점을 융합한 것으로, 이 논문에서는 유전자 알고리즘을 사용하여 제어기의 성능을 개선한다.

## 2.1.1 제어파라미터 자동동조 HFC

HFC의 기본요소는 환산계수, 언어적 제어규칙, 하중계수, 제어 파라미터로 구성된다. 이 시스템의 제어입력은 과도상태에서의 퍼지 제어기 출력과 정상상태에서의 PID 제어기 출력의 컨벡스(convex)결합이다. HFC의 기본 구조는 그림 1과 같다. 하이브리드 퍼지제어기는 기존의 PID 제어기의 장점을 퍼지제어기의 장점을 융합하여 설계한 하이브리드형 퍼지 제어기이다. 공정 제어분야에서 가장 많은 부분을 차지하는 PID 제어기에 있어서 단점은 프로세스가 긴 지연시간과 강한 비선형성을 내포하고, 프로세스 잡음이 존재하는 경우 PID 제어만으로는 만족한 결과를 얻을 수 없다. 이러한 단점을 보완하기 위해 퍼지제어를 융합한 하이브리드형 제어기를 사용하여 그 성능을 개선한다.

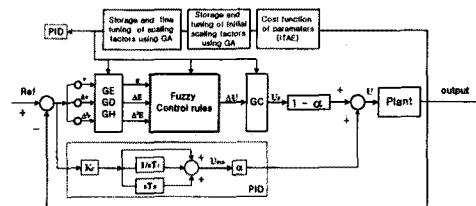


그림 1. 제어 파라미터 및 제어규칙 추정을 통한 자동동조 퍼지 제어기의 구성도

그림 1은 PID 파라미터, 환산계수, 언어적 제어규칙들을 자동동조하는 HFC의 구성도이다. 여기서,  $(1 - \alpha)$ 는 퍼지 제어기의 하중계수,  $\alpha$ 는 PID 제어기의 하중계수.  $U_{PID}$ 는 PID 제어기의 조작량,  $U_F$ 는 퍼지 제어기의 조작량,  $U$ 는 HFC의 조작량을 나타낸다.

HFC는 PID제어기와 퍼지 제어기의 효과적인 합성을 위하여 그림 2의 하중계수 ( $\alpha$ )를 이용한다. 설정치와 출력의 절대오차가 크면  $\alpha$ 는 작으므로 퍼지 제어기의 영향이 크고, 그 반대이면 PID 제어기의 영향이 크게된다. 따라서

HFC의 출력은 식 (1)과 같다.

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

여기서, 하중계수 ( $\alpha$ )는 그림 2와 같은 삼각형 형태의 멤버쉽 함수로 구성되어진다.

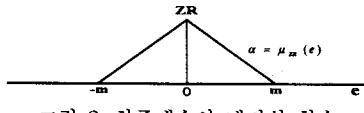


그림 2. 하중계수의 멤버쉽 함수

## 2.2 HFC의 최적설계

퍼지 제어기는 일반적으로 식 (2) 형태와 같은 N개의 독립된 제어규칙을 구성한다.

$$\begin{aligned} R^i : & \text{ IF } E_k \text{ is } A_i, \Delta E_k \text{ is } B_i, \text{ and } \Delta^2 E_k \text{ is } C_i \\ & \text{then } \Delta U_k \text{ is } D_i \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,

$R^i$  : i번째 제어 구현 규칙 ( $i=1, 2, \dots, N$ ),  
 $E_k$  : 오차(error)값,  $\Delta E_k$  : 오차의 변화값,  $\Delta^2 E_k$  : 변동오차의 변화값  $\Delta U$  : 플랜트 제어입력의 변화값,  
 $A_i, B_i, C_i$  : 퍼지 변수  $D_i$  : 싱글톤(Singleton)  
제어규칙에서 출력변수의 멤버쉽 함수는 각각 그림 3 및 그림 4와 같이  $[-1, 1]$ 에 의해 규준화된 삼각형 형태를 사용한다.

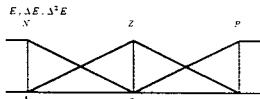


그림 3. 전반부 입력변수  $E, \Delta E, \Delta^2 E$ 의 멤버쉽함수

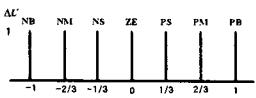


그림 4. 후반부 출력변수  $\Delta U$ 의 멤버쉽 함수

전반부의 언어적 제어변수는 오차 ( $E$ ), 오차의 변화치 ( $\Delta E$ ), 변동오차의 변화치 ( $\Delta^2 E$ )에 대해, N, Z, P의 3개로 구성되고, 후반부의 출력변수는  $\Delta U$ 에 대해 NB, NM, NS, ZE, PS, PN, PB의 7개로 구성되며, 전체적인 제어규칙은 표 1과 같다. 각각의 규칙에 있어 전반부의 추론값은 식 (3)과 같고, 퍼지 제어기의 비퍼지화 과정을 거친 후반부 추론결과 값은 식 (4)와 같다.

$$W_i = \{ \mu_{A_i}(E_k), \mu_{B_i}(\Delta E_k), \mu_{C_i}(\Delta^2 E_k) \} \quad (3)$$

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

표 1. 3변수 퍼지 제어규칙

$$(a) \Delta^2 E = N \quad (b) \Delta^2 E = Z \quad (c) \Delta^2 E = P$$

	$\Delta E$		
	N	Z	P
E	NB	NB	NM
Z	NM	NS	ZE
P	ZE	PS	PM

	$\Delta E$		
	N	Z	P
E	NB	NM	NS
Z	NS	ZE	PS
P	PS	PM	PB

	$\Delta E$		
	N	Z	P
E	NM	NS	ZE
Z	ZE	PS	PM
P	PS	PM	PB

## 2.3 최적화 알고리즘

제어기 설계시 무엇보다도 중요한 것은 제어 파라미터를 최적으로 동조하는 것이다. 제어 응답특성을 최적화

하기 위한 ITAE를 유전자 알고리즘의 목적함수로 사용한다. HFC는 모든 제어 파라미터들을 동시에 동조하며, 목적함수 ITAE의 최소화를 위해 이를 제어 파라미터를 유전자 알고리즘을 이용하여 구한다. 본 논문에서는 유전자 알고리즘의 초기값으로 사용되는 PID 제어기의 파라미터 및 퍼지 제어기의 환산계수를 구하기 위하여 각각 PID 제어기는 Cohen-Coon, Haalman 방법 및 릴레이 자동 동조 방법을 사용하여 PID 파라미터의 초기값을 구하고 퍼지 제어기는 퍼지 추론과정의 전, 후반부 변수의 규준화된 값과 공정 설정치 및 오차를 이용한 세 가지 추정모드를 이용하여 환산계수 및 후반부 멤버쉽 함수 파라미터를 구한 뒤 유전자 알고리즘을 이용하여 이 제어 파라미터들을 추정하였다.

### 2.3.1 유전자 알고리즘

공정을 수행하기 전에 설정해 주어야 하는 여러 종류의 제어 파라미터는 제어기의 성능에 민감하게 작용하기 때문에, 이 값을 최적으로 설정해주는 것이 제어기의 성능을 향상시키는데 중요한 역할을 한다. 본 논문에서는 이 값을 최적으로 설정하기 위해 유전자 알고리즘을 이용하게 된다. 유전자 알고리즘은 자연 세계의 진화 과정(유전자적 특성, 적자생존)을 이용한 병렬탐색 알고리즘이다. 유전자 알고리즘은 절으로는 임의선택방법의 형태를 띠지만, 이를 바탕으로 근거 있는 다른 정보가공을 통하여 최적지점을 찾아나간다. 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 개체를 동시에 여러 개 사용되는데 이를 군집이라 한다. 유전자 알고리즘은 이렇게 생성된 개체들을 모아 하나의 집단을 구성하여 진화를 시킴으로서 최적의 해를 구한다. 선택연산은 룰렛방식, 교배연산은 single point crossover 연산을 사용한다. 그리고 돌연변이 연산은 선택된 비트를 반전시키는 invert 방식을 사용한다. 본 논문에서는 세대는 100세대, 군집은 60개체, 각 문자열의 길이를 2진 형태로 10 bit, 교배율은 60 %, 돌연변이 발생율은 35%를 사용하였다. 유전자 알고리즘의 목적함수로서 식(5)와 같은 ITAE를 사용하였다.

$$ITAE = \int_0^T t |e(t)| dt \quad (5)$$

표 2. 적용된 유전자 알고리즘의 매개변수

No. of generation	100
crossover rate	0.6
mutation rate	0.35
Population size	60

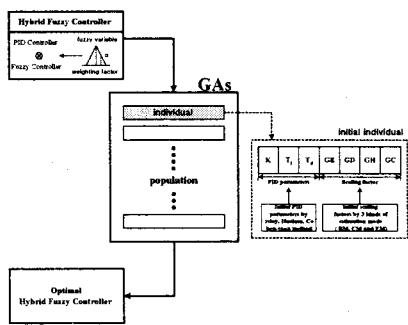


그림 5. 제어파라미터 동조를 위한 유전자 알고리즘의 초기 개체군 선정

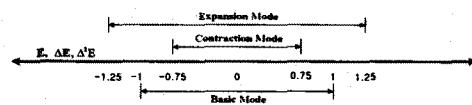


그림 6. 환산계수 추정을 위한 세 가지 모드

### 3. 컴퓨터 시뮬레이션 결과 및 고찰

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

공정 1(수식 6)은 PID 파라미터를 릴레이 동조 방법 및 cohen-coon 방법에 의한 초기치를 이용하여 자동동조하였다. 그림 7 (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), HFC(FPI+PI)(5) 및 퍼지 규칙의 후반부 멤버쉽을 동조한 HFC(6)의 응답결과를 보인 것이다. 그림 7 (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), HFC(5) 및 퍼지 규칙의 후반부 멤버쉽을 동조한 HFC(6)의 응답 결과를 보인 것이다.

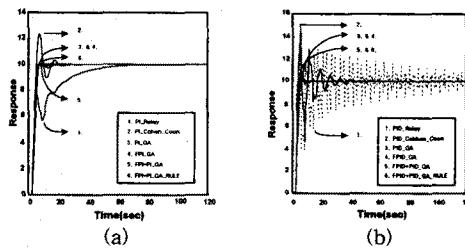


그림 7. 각 제어기들의 자동튜닝된 응답

표 3. 각 제어기의 성능비교

	PID	FPI	FPI+PI	FPI+PI (Rule생성)	PID	FPIID	FPIID+PID	FPIID+PI (Rule생성)
ITAE	123.0	123.1	84.35	72.75	78.21	80.86	68.52	94.89
Overshoot (%)	9.64	3.33	0.04	0.06	3.48	3.55	5.89	0
상승시간 (sec)	3.26	3.34	2.47	2.44	2.37	2.37	2.18	2.20

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

공정 2(수식 7)는 릴레이 동조방법 및 Haalman에 의해 PID 제어기의 파라미터의 초기값을 각각 설정하고, 세 가지 파라미터 추정모드에 의한 퍼지 환산계수의 초기값을 설정한 후 이를 퍼지 제어기와 파라미터들을 동시에 유전자 알고리즘을 이용하여 추정하였다. 그림 8 (a), (b)는 하이브리드 퍼지 제어기 및 퍼지 규칙을 동조한 하이브리드 퍼지 제어기의 응답결과를 보인 것이다.

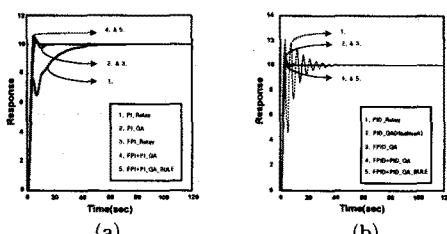


그림 8. 각 제어기의 자동튜닝된 응답

표 4는 유전자 알고리즘에 의해 동조된 각 제어기의 성능지수와 특성을 비교한 것이다.

표 4. 각 제어기의 성능비교

	PID	FPI	FPI+PI	FPI+PI (Rule생성)	FPIID	FPIID+PID	FPIID+PI (Rule생성)
ITAE	68.515	68.595	51.803	39.392	45.745	36.925	37.103
Overshoot	3.00 %	3.34 %	6.05 %	2.39	5.49 %	3.12 %	2.77 %
상승시간	2.82	2.82	2.05	1.85	2.05	1.80	1.85

$$\frac{Q(s)}{V_i(s)} = \frac{K_t}{JL_i s^2 + (JR_i + L_i B)s + K_t K_e + R_i B} \quad (8)$$

공정 3(수식 8)은 제안된 HFC에 적용된 DC motor은 나타낸다. DC motor의 속도제어에 적용된 각 제어기들의 성능을 비교 평가한 것이며 그림 9(b)는 모터의 정·역회전시의 제어 성능을 나타낸 것이다.

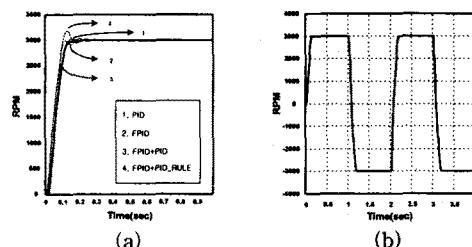


그림 9. 자동튜닝된 각 제어기의 응답 및 HFC의 응답

표 5. 성능지수 비교평가

	PID	FPIID	FPIID+PID
ITAE	8.5568	8.4753	8.6582
Overshoot	1.10	1.17	0.04
상승시간	0.106	0.075	0.107

### 4. 결론

본 논문에서는 PID 제어기와 퍼지 제어기를 하중계수를 이용하여 결합한 HFC의 설계방법론을 제안하며, 체계적인 초기값 설정방법에 기반한 GAs를 통한 HFC의 최적 제어파라미터 추정방법을 제안하였다. 첫째, HFC의 제어파라미터를 추정하기 위하여 기존의 PID 파라미터를 동조하는 릴레이 동조 방법, C-C방법, Haalman 방법을 이용하고 환산계수를 구하기 위하여 BM, CM, EM의 세 가지 추정모드를 이용하여 환산계수를 자동 동조하여 구한 최적의 제어파라미터를 통하여 HFC의 성능을 향상시킨다. 둘째, 공정특성 및 설계자의 의도에 따라 HFC의 퍼지 제어규칙의 후반부 파라미터를 유전자 알고리즘을 이용하여 자동 동조방법으로서 이의 성능을 더욱 향상시킬 수 있다. 시뮬레이션 결과를 통해 제안된 방법론을 이용한 HFC가 기존의 제어기와 비교해 적용성과 우수성을 보임을 알 수 있다.

감사의 글  
본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 (과제번호 : 2000-1-30300-009-3) 지원으로 수행되었음

### 참고 문헌

- [1] K.Astrom and T. Hagglund "PID Controller : Theory, Design and Tuning" Instrument Society of America, 1995.
- [2] Kevin M. Passino and Stephen Yurhovich, "Fuzzy Control", Addison Wesley Longman, Inc, 1998.
- [3] Sungkwan Oh, Taechon Ahn, Hyungsoo Hwang, Jongin 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.