

# 유전자 알고리즘을 이용한 파라미터 추정모드기반 하이브리드 퍼지 제어기의 설계

## The Design of Hybrid Fuzzy Controller Based on Parameter Estimation Mode Using Genetic Algorithms

이대근, 오성권, 장성환  
원광대학교 전기전자공학부, 전북 익산시 신용동 344-2  
Tel : 0653)850-6342, E-mail : ohsk@wonms.wonkwang.ac.kr

Dae-Keun Lee, Sung-Kwun Oh and Sung-Whan Jang  
School of Electrical and Electronic Engineering, Wonkwang University

### ABSTRACT

A hybrid fuzzy controller by means of the genetic algorithms is presented. The control input for the system in the HFC is a convex combination of the FLC's output in transient state and PID's output in steady state by a fuzzy variable. The HFC combined a PID controller with a fuzzy controller concurrently produces the better output performance than any other controller. An auto-tuning algorithm is presented to automatically improve the performance of hybrid fuzzy controller using genetic algorithms. The algorithm estimates automatically the optimal values of scaling factors, PID parameters and membership function parameters of fuzzy control rules. Especially, in order to auto-tune scaling factors and PID parameters of HFC using GA, three kinds of estimation modes are effectively utilized. The HFCs are applied to the second process with time-delay. Computer simulations are conducted at step input and the performances of systems are evaluated and also discussed in ITAE(Integral of the Time multiplied by the Absolute value of Error) and other ways.

## I. 서론

제어기를 설계하는 목적은 제어기를 이용하여 공정의 다양한 동특성을 보완하기 위해서이다. PID 제어기는 설계 및 제어변수 동조의 간편성이 인식되어 많은 분야에서 적용되고 있다[1]. 그러나 이러한 기존의 PID 제어기는 복잡하고 비선형적인 공정에 적용시 과도상태에서 이의 적용 효율성에 대한 의문이 제기되어 왔다. 반면, 퍼지 제어기는 인간의 경험과 지식에 근간한 언어적 제어 규칙을 사용할 수 있어 비선형 공정 제어시의 적합함과 우수성이 입증되어 왔다[2]. 그러나 이를 표현하는 언어적 제어 규칙이 인간의 경험이나 지식을 완벽하게 표현할 수 없어 편향적(biased)이 될 수도 있다[3]. 과도상태에서는 퍼지 제어기를 주로 사용하고 정상상태에서는 PID 제어기를 주로 사용하여 각 제어기의 장점을 부각시킬 수 있는 하이브리드 퍼지 제어기(HFC)의 필요성이 대두되었다[3]. 복잡한 시스템 제어시 어려움 중 하나는 많은 제어 파라미터들을 최적으로 선택하는 것이다. 본 논문에서는, 첫째 하이브리드 퍼지 제어기를 제안한다. 둘째 릴레이 자동동조방법 및 Hallman 방법을 기반으로 한 유전자 알고리즘을 이용하여 HFC의 성능을 자동으로 개선시키는 효과적

인 자동동조 알고리즘을 소개한다[4]. 본 논문에서는 유전자 알고리즘을 제어기에 적용시 PID 제어기의 파라미터를 구하는 여러 가지 방법, 즉 릴레이 자동동조 방법, Hallman 방법을 이용하여 구해진 파라미터 값을 유전자 알고리즘의 초기값으로 설정한 뒤 이를 기준으로 범위를 구분, 확장하여 최적의 PID 파라미터를 구한다. 그리고 기본, 축소, 확장의 세 가지 추정모드에 의한 자동튜닝 방법으로부터 퍼지 제어기의 환산계수를 구하여 하이브리드 퍼지 제어기의 성능을 개선한다. 본 논문에서 제안된 제어기의 우수성과 적용성을 입증하기 위하여 시간지연을 가지는 2계 공정에 적용하여 모의 실험을 수행하였으며 제어기의 성능 평가지수로서 ITAE(Integral of the Time multiplied by the Absolute value of Error), 오버슈트, 상승시간을 사용하였다[5].

## II. 본론

### 2.1 퍼지 제어기

HFC는 기존의 PID 제어기와 퍼지 제어기의 장점을 융합한 것으로, 이 논문에서는 유전자 알고리즘을 이용하여 하이브리드 퍼지 제어기의 성능을

개선한다. 시스템에 대한 제어 입력은 퍼지 제어기 및 PID 제어기 출력에 대한 퍼지 변수의 컨벡스 결합으로 각 제어기출력에 하중값을 곱한 합성치를 이용한다. HFC는 식(1)과 같은 퍼지 논리규정에 의하여 N개의 퍼지 제어규칙을 구성한다.

$R^i$ : If  $E^k$  is  $A_i$ ,  $\Delta E_k$  is  $B_i$ , and  $\Delta^2 E_k$  is  $C_i$   
then  $\Delta U_k$  is  $D_i$  (1)

$R^i$ : i번째 제어규칙 ( $i=1,2,\dots,N$ )

$E_k$ : 오차,  $\Delta E_k$ : 오차변화,  $\Delta^2 E_k$ : 변동오차변화

$\Delta U_k$ : 제어 입력의 변화

$A_i, B_i, C_i$ : 퍼지변수,  $D_i$ : 싱글톤(Singleton)

각각의 규칙에 있어 전반부 추론값은 식 (2)와 같고, 퍼지 제어기의 비퍼지화 과정을 거친 후반부 추론결과 값은 식 (3)과 같다.

$$W_i = \min\{\mu_A(E_k), \mu_B(\Delta E_k), \mu_C(\Delta^2 E_k)\} \quad (2)$$

$$\Delta U^{*k} = \frac{\sum_{i=1}^N W_i D_i}{\sum_{i=1}^N W_i} \quad (3)$$

제어 규칙에서 입출력 변수의 멤버십 함수는 그림 1,2와 같이 [-1,1]에 의해 표준화된 삼각형 형태를 사용한다.

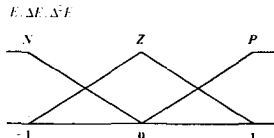


그림 1. 전반부 입력변수  $E, \Delta E, \Delta^2 E$ 의 멤버십 함수  
Fig. 1. Membership functions of premise input variables  $E, \Delta E$  and  $\Delta^2 E$

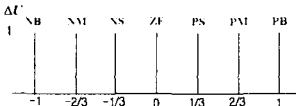


그림 2. 후반부 출력변수  $\Delta U$ 의 멤버십 함수  
Fig. 2. Membership functions of consequence output variable,  $\Delta U$

표 1. 3변수 퍼지 제어규칙

Table 1. Fuzzy control rules for 3-fuzzy variables

		$\Delta^2 E=N$			$\Delta^2 E=Z$			$\Delta^2 E=P$			
		JE			JE			JE			
		N	Z	P	N	Z	P	N	Z	P	
E	N	NB	NB	NI	N	NB	NI	NS	Z	ZE	PS
	Z	NI	NS	ZE	Z	NS	ZE	PS	Z	ZE	PS
P	N	ZE	PS	PI	P	PS	PI	PB	P	PI	PB
	Z	PS	PI	PB	P	PI	PB	PB	P	PB	PB

하이브리드 퍼지 제어기는 PID 제어기와 퍼지 제어기의 효과적인 합성을 위하여 그림 3과 같이 표현되는 하중계수 ( $\alpha$ )를 이용한다. 이 가중치로부터 과도상태 부근에서는 퍼지 제어기의 영향이, 정상상태 부근에서는 PID 제어기의 영향이 보다 강하게 나타난다. 합성 제어출력은 식 (4)와 같다. 제어규칙은 표 1과 같다.

$$U = \alpha \cdot U_{PID} + (1-\alpha) \cdot U_F \quad (4)$$

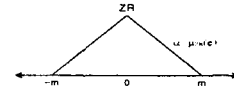


그림 3. 하중계수의 멤버십 함수  
Fig. 3. Membership function of weighting coefficient

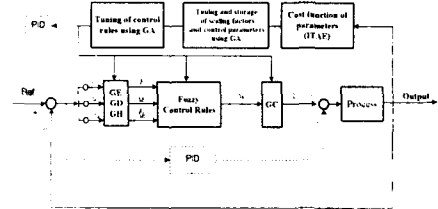


그림 4. 제어 파라미터 및 제어규칙 추정을 통한 자동동조 퍼지 제어기의 구성도  
Fig. 4. The scheme of auto-tuning fuzzy controller with estimation of control parameters and control rules

그림 4는 유전자 알고리즘을 사용하여 제어 파라미터를 자동 추정하는 퍼지 제어기의 구성도를 나타낸다.

## 2.2 최적화 자동동조 방법

제어기 설계시 무엇보다도 중요한 것은 제어 파라미터를 최적으로 동조하는 것이다. 제어 응답특성을 최적화하기 위한 ITAE를 유전자 알고리즘의 목적함수로 사용한다. HFC는 모든 제어 파라미터들을 동시에 동조하며, 목적함수 ITAE의 최소화를 위해 이들 제어 파라미터를 유전자 알고리즘을 이용하여 구한다. 본 논문에서는 유전자 알고리즘의 초기값으로 사용되는 PID 제어기의 파라미터 및 퍼지 제어기의 환산계수를 구하기 위하여 각각 PID 제어기는 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 모드를 이용하여 환산계수 및 후반부 멤버십 함수 파라미터를 구한 뒤 유전자 알고리즘을 이용하여 이 제어 파라미터들을 추정하였다.

## 2.3 유전자 알고리즘(Genetic Algorithms)

공정을 수행하기 전에 설정해 주어야 하는 여러 종류의 제어 파라미터는 제어기의 성능에 민감하게 작용하기 때문에, 이 값들을 최적으로 설정해주는 것이 제어기의 성능을 향상시키는데 중요한 역할을 한다. 본 논문에서는 이 값들을 최적으로 설정하기 위해 유전자 알고리즘을 이용하게 된다.

유전자 알고리즘은 자연 세계의 진화 과정(유전자적 특성, 적자생존)을 이용한 병렬탐색 알고리즘이다. 유전자 알고리즘은 겉으로는 임의선택방법의 형태를 띠지만, 이를 바탕으로 근거 있는 다른 정보가공을 통하여 최적지점을 찾아나간다. 유전자 알고리즘에서 사용하는 수는 기본적인 형태로 실수를 사용하지만 내부적으로 이진 스트링을 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 개체를 동시에 여러 개 사용하는데 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[4].

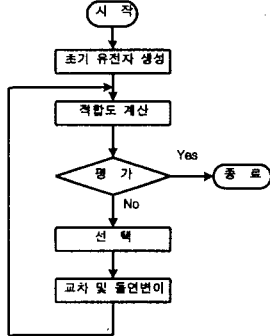


그림 5. 유전자 알고리즘의 수행순서

Fig. 5. Flowchart of Genetic Algorithms

그림 5는 유전자 알고리즘의 수행과정을 나타내며 수행과정은 다음과 같다.

유전자 알고리즘은 초기 개체군 구성시 문제가 발생할 경우 전역 극소에 의한 최적점 선택이 어렵거나 조기 수렴에 빠질 가능성을 배제할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 하이브리드 퍼지 제어기의 제어 변수들을 유전자 알고리즘을 이용하여 동조함에 있어, 먼저 PID 제어기의 파라미터를 구하기 위한 초기 유전자 값을 Haalman 방법, 릴레이 동조 방법을 사용하여 구하고 이를 50 %, 100 % 비율로 확장 및 세분화하여 최적의 파라미터를 구한다. 그리고 퍼지 제어기의 환산계수에 대한 초기 유전자 값은 공정 설정치 및 공정 편차를 이용한 세 가지 모드를 설정한 뒤 최적의 파라미터를 추정한다.

## 2.4 시뮬레이션 및 결과고찰

제안된 하이브리드 퍼지 제어기를 아래와 같은 지연시간을 가지는 공정에 적용한다.

$$G(s) = \frac{e^{-0.8s}}{(s+1)(s+2)} \quad (5)$$

표 2는 각각 릴레이 자동 동조 방법과 Haalman 방법에 의해 동조된 파라미터를 기반으로 하여 유전자 알고리즘의 초기값을 설정하고 이를 세 가지 경우로 확장하여 동조한 PID 제어기 파라미터 및 제어특성을 나타낸다.

표 2. 유전자 알고리즘을 이용한 PID 제어기 파라미터 및 성능지수

Table 2. PID controller parameters and performance index using genetic algorithms

릴레이 방법에 의한 초기치	K			Haalman 방법에 의한 초기치		
	K	T	T <sub>r</sub>	K	T	T <sub>r</sub>
배율	0 %	50 %	100 %	0 %	50 %	100 %
동조 파라미터	K	1.337	1.368	1.303	1.345	1.341
	T	1.784	1.768	1.967	1.789	1.738
	T <sub>r</sub>	0.459	0.488	0.367	0.437	0.375
ITAE	37.276	41.293	38.886	37.377	40.942	36.906
Overshoot	1.50 %	3.04 %	2.33 %	1.67 %	3.12 %	1.77 %

표 3 (a), (b)는 릴레이 동조방법, Haalman 방법에 의해 PID 제어기의 파라미터의 초기값을 각각 설정하고, 세 추정모드에 의한 퍼지 환산계수의 초기값을 설정한 후 이들 제어 파라미터를 동시에 유전자 알고리즘을 이용하여 자동동조하여 얻은 제어기 성능을 나타낸다. 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 3. 하이브리드 퍼지 제어기의 제어파라미터 및 성능지수

Table 3. 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	0.008	0.011	0.006
	GD	0.097	0.070	0.050	0.029	0.072	0.073	0.036	0.050	0.109	0.087	0.030	0.105
	GH							0.074	0.033	0.081	0.056	0.073	0.035
	GC	20.821	30.381	27.603	39.336	24.377	22.736	38.288	32.497	27.740	38.337	34.938	33.481
배율	0 %			0 %			0 %			0 %			
PID 파라미터	K	0.334	0.251	0.382	0.885	0.563	0.646	0.602	0.328	0.705	0.910	0.777	0.629
	T	8.497	0.986	2.346	2.763	1.536	1.623	0.824	2.889	2.194	1.280	2.198	0.875
	T <sub>r</sub>				0.488	0.731	0.432				0.697	0.336	0.671
ITAE	55.258	51.795	51.807	46.848	39.333	44.338	54.488	54.077	54.967	36.208	44.337	44.921	
Overshoot	16.69 %	14.92 %	6.06 %	3.02 %	2.99 %	5.67 %	4.53 %	3.45 %	5.54 %	8.16 %	2.96 %	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	0.009
	GD	0.073	0.038	0.062	0.065	0.031	0.082
	GH				0.035	0.063	0.085
	GC	22.032	29.501	15.872	31.378	36.891	33.607
배율	30 %			30 %			
PID 파라미터	K	0.704	0.621	1.015	1.089	1.032	0.885
	T	2.442	2.730	2.463	2.489	1.631	1.443
	T <sub>r</sub>	0.601	0.624	0.589	0.484	0.263	0.360
ITAE	42.304	39.804	45.839	41.239	41.952	37.331	
Overshoot	4.30 %	6.72 %	2.97 %	1.66 %	0.01 %	1.28 %	

그림 6 (a), (b)는 하이브리드 퍼지 제어기 (FPI+PI, FPID+PID) 및 퍼지 규칙을 동조한 하이브리드 퍼지 제어기의 응답결과를 보인 것이다.

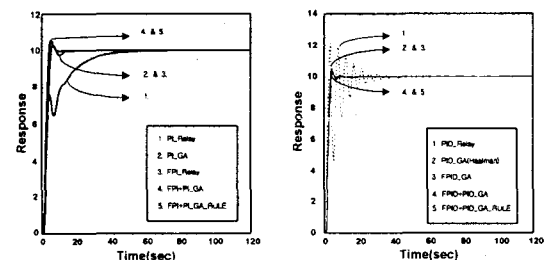


그림 6. 각 제어기의 자동튜닝된 응답

Fig. 6. The auto-tuned response of each controller

그림 7은 하이브리드 퍼지 제어기(FPID+PID)의 공정 출력과 제어 입력, 하중계수에 의한 퍼지 제어기의 제어 입력 및 PID 제어기의 제어 입력을 나타낸다.

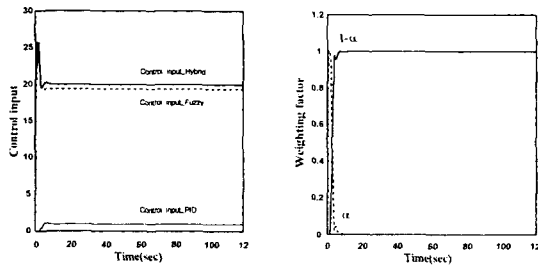


그림 7. 하이브리드 퍼지 제어기의 공정 응답 및 제어 입력  
Fig. 7. The Response and control input of hybrid fuzzy controller

그림 8은 하이브리드 퍼지 제어기(FPID+PID)의 환산계수와 PID 파라미터의 동조과정을 보인다.

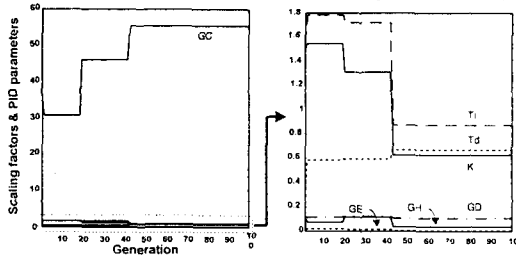


그림 8. 하이브리드 퍼지 제어기의 제어 파라미터 동조 과정  
Fig. 8. The auto-tuning process of control parameters in hybrid fuzzy controller

그림 9는 하이브리드 퍼지 제어기의 제어 성능을 개선하기 위하여 퍼지 제어규칙의 후반부 파라미터를 동조한 결과를 나타내고 있다.

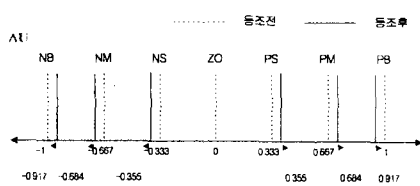


그림 9. 퍼지 제어규칙의 후반부 파라미터 동조  
Fig. 9. Auto-tuning of consequence membership parameter in control rule

표 4는 유전자 알고리즘에 의해 동조된 각 제어기의 성능 지표와 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)형태의 하이브리드 제어기가 최적의 제어기임을 알 수 있다.

표 4. 각 제어기의 성능비교  
Table 4. The performance comparison of each controller

	PI	FPI	FPI+PI	FPI+PID	FPID+PID (Rule 100)	PID	FPID	FPID+PID	FPID+PID (Rule 2.5)
ITAE	68.315	68.315	31.803	39.352	45.745	36.923	37.103	37.331	33.031
Overshoot	3.00 %	3.34 %	0.05 %	1.39 %	5.49 %	3.12 %	2.77 %	1.28 %	3.81 %
상승시간	2.82	2.82	2.05	1.85	2.05	1.80	1.85	1.67	1.89

### III. 결론

본 논문은 유전자 알고리즘을 이용한 PID 제어기와 퍼지 제어기가 결합된 하이브리드 퍼지 제어기를 제안한다.

첫째, PID 제어기의 제어 파라미터를 유전자 알고리즘으로 추정하기 위하여 기존의 PID 파라미터를 동조하는 릴레이 동조 방법, Haalman 방법으로 부터 유전자 알고리즘의 초기값을 선정하는 문제를 해결하고 퍼지 제어기의 환산계수를 구하기 위하여 공정 설정치 및 오차로부터 환산계수의 범위를 정하고 이를 확장, 축소하여 최적의 환산계수를 구함으로써 제어기의 성능을 향상시킨다.

둘째, 가중치에 의한 컨벡스 결합으로 제어 입력을 구성하는 하이브리드 퍼지 제어기를 사용함으로써 퍼지 제어기의 장점과 PID 장점을 최대한 활용하여 제어기의 성능을 향상시킨다.

셋째로, 하이브리드 퍼지 제어기의 제어규칙을 동조함으로써 이의 성능을 더욱 개선시킨다.

컴퓨터 시뮬레이션으로부터 다음과 같은 결론을 이끌어낼 수 있다.

지연특성을 갖는 공정에서 하이브리드 퍼지 제어기(FPI+PI, FPID+PID)는 기존의 PID 및 퍼지 제어기에 비해 ITAE, 오버슈트, 상승시간 등의 성능지수에서 우수한 결과를 보임을 알 수 있다.

이에 공정특성에 적절한 하이브리드 제어기를 설계함으로써 최적의 제어기를 구성함을 알 수 있다.

### IV. 참고문헌

- [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] 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.
- [4] [Goldberg 1989] D.E. Goldberg, Genetic algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning, Addison-Weatley, 1989.
- [5] 오성권, 퍼지모델 및 제어이론과 프로그램, 기다리 출판사, 1999.
- [6] Sungkwun Oh, "Fuzzy Identification by means of Fuzzy Inference method and Its Application to the A.S.P in the Wastewater Treatment system" ASSA, 1995.