

유전자 알고리즘을 이용한 제어파라미터 추정모드기반 HFC

이 대근, 오 성권, 장 성 환  
원광대학교 전기전자공학부

Hybrid Fuzzy Controller Based on Control Parameter Estimation Mode Using Genetic Algorithms

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

**Abstract** - In this paper, a hybrid fuzzy controller using genetic algorithm based on parameter estimation mode to obtain optimal control parameter is presented. First, 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, namely, membership function of weighting coefficient. Second, genetic algorithms is presented to automatically improve the performance of hybrid fuzzy controller utilizing the conventional methods for finding PID parameters and estimation mode of scaling factor. The algorithms 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 input. Computer simulations are conducted to evaluate the performance of proposed hybrid fuzzy controller. ITAE, overshoot and rising time are used as a performance index of controller.

동류닝 방법으로부터 퍼지 제어기의 환산계수를 구하여 HFC의 성능을 개선한다. 본 논문에서 제안된 제어기의 우수성과 적용성을 입증하기 위하여 시간지연을 가지는 1계 공정에 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 융합한 것으로, 이 논문에서는 유전자 알고리즘을 사용하여 제어기의 성능을 개선한다.

2.1.1 제어파라미터 및 퍼지 환산계수 동조를 위한 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 장점과 퍼지제어기의 장점을 융합하여 설계한 하이브리드형 퍼지 제어기이다. 공정 제어 분야에서 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

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]. 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 제어규칙을 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. 과도상태에서는 퍼지 제어기를 주로 사용하고 정상상태에서는 PID 제어기를 주로 사용하여 각 제어기의 장점을 부각시킬 수 있는 HFC의 필요성이 대두되었다[3]. 복잡한 시스템 제어시 어려움 중 하나는 많은 제어 파라미터들을 최적으로 선택하는 것이다. 본 논문에서는, 첫째 HFC를 제안한다. 둘째 릴레이 자동동조방법 및 Cohen-Coon방법을 기반으로한 유전자 알고리즘을 이용하여 HFC의 성능을 자동으로 개선시키는 효과적인 자동동조 알고리즘을 소개한다[4]. 본 논문에서는 유전자 알고리즘을 제어기에 적용시 PID 제어기의 파라미터를 구하는 여러 가지 방법, 즉 릴레이 자동동조 방법, Coonhen Coon 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 자

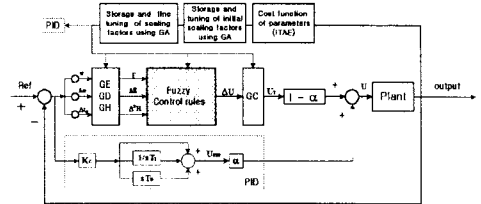


그림 1. 제어 파라미터 및 제어규칙 추정을 통한 자동동조 퍼지 제어기의 구성도

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

다. 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 멤버십 함수로 구성되어진다.

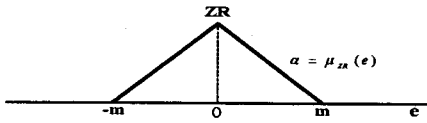


그림 2. 하중계수의 멤버십 함수

## 2.2 HFC의 최적 설계

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

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

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 입력변수의 멤버십 함수는 각각 그림 3 및 그림 4와 같이 [-1,1]에 의해 균준화된 삼각형 형태를 사용한다.

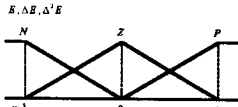


그림 3. 전반부 입력변수  $E, \Delta E, \Delta^2 E$ 의 멤버십함수

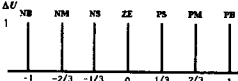


그림 4. 후반부 출력변수  $\Delta U$ 의 멤버십 함수

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

	$\Delta^2 E = N$			$\Delta^2 E = Z$			$\Delta^2 E = P$		
	$\Delta E$	$\Delta E$	$\Delta E$	$\Delta E$	$\Delta E$	$\Delta E$	$\Delta E$	$\Delta E$	$\Delta E$
$E$	NB	NB	NM	NB	NM	NS	NM	NS	ZE
$E$	Z	NM	NS	ZE	PS		ZE	PS	PM
$E$	P	ZE	PS	PM			PM	PB	PB

## 2.3 최적화 자동동조 알고리즘

제어기 설계시 무엇보다도 중요한 것은 제어 파라미터를 최적으로 동조하는 것이다. 제어 응답특성을 최적화하기 위한 ITAE를 유전자 알고리즘의 목적함수로 사용

한다. 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 Cohen-Coon 방법 및 릴레이 자동 동조 방법을 사용하여 PID 파라미터의 초기값을 구하고 퍼지 제어기는 퍼지 추론과정의 전, 후반부 변수의 균준화된 값과 공정 설정치 및 오차를 이용한 세 가지 추정모드를 이용하여 환산계수 및 후반부 멤버십 함수 파라미터를 구한 뒤 유전자 알고리즘을 이용하여 이 제어 파라미터들을 추정하였다.

### 2.3.1 유전자 알고리즘 (Genetic Algorithm)

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 진화과정(유전자적 특성, 적자생존)을 이용한 병렬탐색 알고리즘이다. 유전자 알고리즘은 겉으로는 임의선택방법의 형태를 띄지만, 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 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]. 유전자 알고리즘의 목적함수로서 식(5)와 같은 ITAE를 사용하였다.

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

• GAs의 실행 순서

- 1) 적용할 목적함수와 유전자로 이용할 변수를 결정
- 2) 유전자와 군집의 크기를 결정한다.
- 3) 난수를 이용해 1세대 유전자를 생성한다.
- 4) 재생산 연산자로 교배대상을 선정한다
- 5) 교배를 위해 짝을 결정한다.
- 6) 돌연변이 연산을 행한다.
- 7) 교차연산자를 이용해 짝짓기를 한다.
- 8) 새로운 세대의 군집을 형성한다.
- 9) 만족한 결과가 나오지 않으면 단계 4)로 간다.

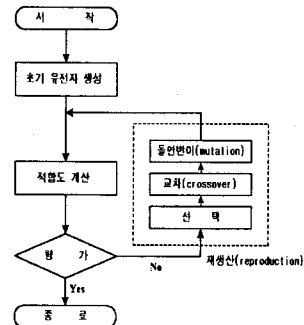


그림 5. 유전자 알고리즘의 순서도

### 3. 컴퓨터 시뮬레이션 결과

제안된 HFC를 식 (6)과 같은 지연시간을 가지는 공정에 적용한다.

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

표 2는 Cohen-Coon 방법과 릴레이 동조 방법을 사용하여 구한 PID 제어기의 파라미터 값이다. 이를 이용하여 유전자 알고리즘의 초기값을 구한다. 표 2에 의해 구해진 값을 이용해 0%, ±50%, ±100% 배율의 범위로 확장·세분화하여 이를 유전자 알고리즘의 초기 범위로 사용한다.

표 2. 릴레이 동조 방법 및 Cohen-coon방법에 의한 PID 제어기 파라미터

동조 방법	RELAY		Cohen-Coon	
제어기	PI	PID	PI	PID
동조된 K	0.613	0.793	0.533	0.914
파라미터 T	6.667	4.0	1.895	3.035
비율		1.0		0.533

표 3은 지연시간을 가지는 공정을 유전자 알고리즘으로 동조한 HFC의 각 모드의 퍼지 환산계수와 PID 파라미터값 및 각 제어기의 성능지수를 나타내고 있다. PID 파라미터를 릴레이 동조 방법에 의한 초기치를 이용하여 자동동조 하였다. PID 제어기와 퍼지 제어기 합성에 의한 HFC의 경우에 퍼지 제어기의 초기 유전자 값은 그림 6과 같이 세 가지 모드(BM, CM, EM)로 세분하고, PI 혹은 PID 제어기의 초기 유전자 값은 각각 단독의 PI 및 PID 제어기 적용시 제어성능이 우수한 값을 유전자 알고리즘의 초기치 및 초기범위로 하여 자동튜닝한 여러 형태의 HFC를 나타낸다. 표 8에서 퍼지 제어기와 PID 제어기가 결합된 HFC는 퍼지 제어기 및 PID 제어기가 단독으로 사용될 경우 보다 성능지수가 개선됨을 알 수 있다.

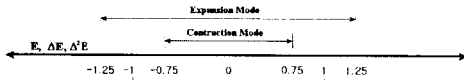


그림 6. 환산계수 추정을 위한 세 가지 모드

표 3. HFC의 제어파라미터 및 성능지수

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
제어 성능 지수	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
오버슈트 (%)	0.05	0.07	0.04	0.05	0.03	0.03	0.07	0.04	0.10	0.06	0.06	0.09
정착 시간 (sec)	9.44	8.03	10.02	10.61	21.46	19.38	19.35	25.71	17.44	20.41	19.06	18.65
편향	0%			0%			0%			0%		
PID 제어기	0.13	0.15	0.07	0.19	0.26	0.41	0.35	0.33	0.19	0.37	0.54	0.24
비율	1.94	1.77	1.91	1.38	1.77	2.10	1.13	1.34	0.73	1.94	1.90	1.04
비율	0.908			0.851	0.631				0.510	0.523	0.471	
ITAE	93.82	90.91	103.05	66.67	78.53	90.04	97.89	91.32	87.45	78.12	85.81	68.52
오버슈트 (%)	3.38	6.63	1.13	4.08	8.31	10.48	3.26	2.49	3.74	3.21	1.73	5.89

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(FPID+PID)(5) 및 퍼지 규칙의 후반부 멤버쉽을 동조한 HFC(6)의 응답 결과를 보인 것이다.

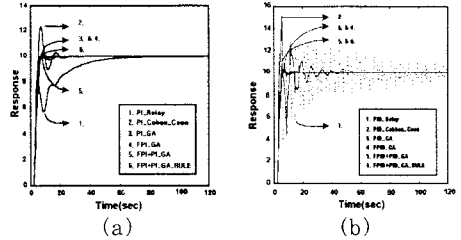


그림 7. 각 제어기들의 자동튜닝된 응답  
그림 8은 HFC의 제어 입력, PID 및 퍼지 제어기의 제어 입력 그리고 PID 및 퍼지 제어기의 하중계수에 의한 가중치를 나타낸다. 과도상태에서는 퍼지 제어기가 정상상태에서는 PID 제어기가 보다 활성화된다.

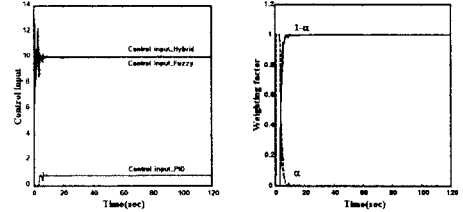


그림 8. HFC의 제어 입력과 하중계수의 효과

표 4. 각 제어기의 성능비교

	PI	FPI	FPI+PI	FPI+PI (규칙 동조)	PID	FPID	FPID+PI	FPID+PI (규칙 동조)	FPI+PI (규칙 동조)
ITAE	123.0	123.1	84.35	72.75	78.21	80.86	68.52	94.89	64.91
오버슈트 (%)	3.64	3.33	0.04	0.06	3.48	3.55	5.89	0	6.96
정착 시간 (sec)	3.26	3.34	2.47	2.44	2.37	2.37	2.18	2.20	2.08

### 3. 결 론

본 논문에서는 PID 제어기와 퍼지 제어기가 퍼지변수로 표현되는 하중계수의 컨벡스 결합으로 융합된 HFC를 제안하고 유전자 알고리즘을 이용한 HFC의 최적 제어파라미터 추정방법을 제안하였다. 첫째, PID 제어기의 제어 파라미터를 유전자 알고리즘으로 추정하기 위하여 기존의 PID 파라미터를 동조하는 릴레이 동조 방법, Cohen-Coon 방법으로부터 파라미터를 구하고 이를 유전자 알고리즘의 초기값으로 사용하여 0%, ±50%, ±100% 배율로 확장 및 세분화한 초기치 범위로부터 제어 파라미터를 자동 동조함으로써 최적의 제어 성능을 얻는다. 또한 퍼지 제어기의 환산계수를 구하기 위하여 BM, CM, EM의 세 가지 추정모드를 이용한 초기치 범위에 의해 환산계수를 자동 동조하여 구한 최적의 환산계수로 제어기의 성능을 향상시킨다.

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

#### [참 고 문 헌]

- [1] K.Astrom and T. Hagglund, "PID Controller : Theory, Design and Tuning." Instrument Society of America, 1995.
- [2] Xian-Tu Peng, "Self-regulating PID controllers and its applications to a temperature controlling process." Fuzzy Computing, pp.355-364, North Holland, 1988.
- [3] T.j.Procyk and E.H.Mamdani, "A linguistic synthesis of fuzzy controller." Automatica, vol.15, pp.15-30, 1979.
- [4] Zbigniew Michalewicz, "Genetic algorithms + Data Structures = Evolution programs." Springer verlag, 1992.