

하이브리드 퍼지제어기의 설계를 위한 최적 자동동조알고리즘

김중영\*, 이대근\*, 오성권\*, 김현기\*\*  
 원광대학교 전기전자공학부, 수원대학교 전기전자정보통신공학부

Optimal Auto-tuning Algorithm for Design of a Hybrid Fuzzy Controller

Joongyoung Kim\*, Daekeun Lee\*, Sungkwun Oh\*, Hyunki Kim\*\*

\*Division of Electrical & Engineering of Wonkwang Univ. \*\*Dept of Electrical Engineering Suwon Univ.

**Abstract** - In this paper, the design method of a hybrid fuzzy controller with an optimal auto-tuning method is proposed. The conventional PID controller 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 powerful auto-tuning algorithm is presented to automatically improve the performance of controller, utilizing the improved complex method and the genetic algorithm. The algorithm estimates automatically the optimal values of scaling factors and PID coefficients.

Controllers are applied to the plants 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.

지수 ITAE(Integral of product Time and Absolute Error)를 사용한다.

2. 본 론

2.1 제어기의 설계

2.1.1 PID 제어기

PID제어기의 기본식은 오차 E에 비례하여 출력을 내는 비례동작(Proportion action:P동작), E의 적분에 비례하여 출력을 내는 적분동작(Integral action:I동작)과 E의 미분에 비례하여 출력을 내는 미분동작(Derivative action:D동작)의 조합으로 표현된다. PID제어기의 블록선도는 그림 1에 나타나고, 일반식은 식 (1)과 같다.

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

여기서,  $K_c$ :비례 이득,  $T_I$ :적분시간,  $T_D$ :미분시간  
 $e(t) = r(t) - y(t)$ ,  $r(t)$ : 설정값,  $y(t)$ : 공정출력값

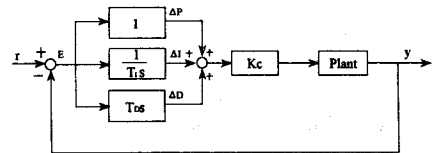


그림 1. PID 제어기의 블록선도

Fig 1. Block diagram of PID controller

1. 서 론

1700년대 와트의 증기기관에 사용된 조속기 제어가 PID제어의 기원이며, Maxwell이 이론적 해석을 하고, 1868년에 "On Governor"를 발표한 것이 제어이론의 시작이라고 말해진다. 그 후 각종 새로운 제어이론이 제안되어왔고, 또 연산방식도 아날로그 방식에서 디지털 방식으로 변환되어 고정도, 고속의 연산을 자유자재로 할 수 있게 되었으며, 현재 산업 시스템 제어의 기반은 PID 제어기가 차지하고 있다.

PID 제어기는 파라미터 동조와 제어기 구상의 간략성 때문에 널리 적용되어 쓰이고 있다. 그러나 선형관계가 있는 공정에서 기존 PID 제어기는 제어환경이나 변수의 변화에 매우 민감하기 때문에, 복잡하고 비선형적인 공정에 대한 효율성은 과도상태에 있어 단점이 되고 있다 [5]-[7].

본 논문에서는 첫째, 퍼지논리제어기와 기존의 PID 제어기로 구성된 하이브리드 제어기를 제안한다. 둘째, 개선된 컴플렉스방법, 유전자 알고리즘을 이용한 강력한 자동동조알고리즘이 제어기의 성능을 개선하기 위해 사용된다. 이 방법은 오차변화를 및 제어출력의 제한조건에 의해, 환산계수와 PID파라미터의 최적값을 자동적으로 동조한다[8,9].

제안된 방법의 성능을 평가하기 위하여 지연시간을 갖는 공정과 DC 서보 모터를 시뮬레이션 하였으며, 오버슈트의 개선과 빠른 정정시간에 높은 효과를 위해 평가

2.1.2 하이브리드(Hybrid) 퍼지 논리 제어기

하이브리드 퍼지 논리 제어기(HFLC)는 퍼지 논리 제어기(FLC)와 PID 제어기로 구성된다. 다시 말해, 시스템의 제어 입력은 과도상태에서의 FLC출력과 정상상태에서의 PID출력의 컨벡스(Convex)결합값이다. 하이브리드 퍼지 논리 제어기의 기본 요소는 환산계수, 언어적 제어 규칙, 하중계수, 제어 파라미터로 구성된다. 하이브리드 논리 제어기의 기본 구조는 그림 2와 같다. 퍼지 제어기는 일반적으로 식 (2)의 형태를 취하는 N개의 독립적인 제어규칙을 구성한다.

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

여기서,

- $R^i$ : i 번째의 제어 구현 규칙 (i=1,2,...,N),
- $E_k$ : 오차(error)값,  $\Delta E_k$ : 오차의 변화값,
- $\Delta^2 E_k$ : 오차의 변화변동오차의 변화,
- $AU_k$ : 플랜트 제어 입력의 변화값,
- $A_i, B_i, C_i, D_i$ : 퍼지 변수.

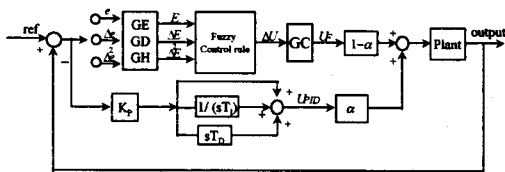


그림 2. 하이브리드 퍼지 논리 제어기의 구조  
Fig 2. The scheme of hybrid fuzzy logic controller

PID 제어기와 퍼지 논리 제어기의 효과적인 합성을 위해 하중계수를 이용하게 되는데, 이 하중계수를 멤버십 함수로 삼각형 형태를 사용하여 구성하며, 설정치와 출력의 절대오차가 크면  $\alpha$ 는 작으므로 퍼지 논리 제어기의 영향이 크고, 그 반대이면 PID 제어기의 영향이 크게 된다. 따라서, 하이브리드 퍼지 논리 제어기의 출력은 식 (3)과 같다.

$$U = \alpha \cdot U_{PID} + (1 - \alpha) \cdot U_f \quad (3)$$

## 2.2 최적화 자동동조알고리즘

### 2.2.1 릴레이 자동동조방법

Ziegler-Nichols(Z-N)[1,2]의 PID 제어기 동조법을 사용한다. Z-N 동조법은 비례기의 이득  $K_c$ 의 값을 증가시키면서 진동하게 되는 값을 찾아서, 임계이득과 임계주기를 구한 값에 의해 제어 파라미터의 값을 계산하는데, 이 방법은 엔지니어들의 많은 주의가 요구된다. Aström과 Hägglund는 임계이득과 임계주기를 자동으로 구하기 위해 릴레이 자동동조방법을 제안하여 임계 진동을 생성한다. 릴레이 동조 실험은 그림 3에 보인 것과 같다.

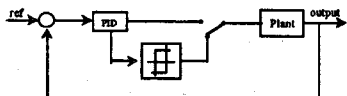


그림 3. 릴레이 동조실험  
Fig 3. Tuning experiment by relay

### 2.2.2 개선된 콤플렉스(Complex) 방법

제어 파라미터와 환산계수는 개선된 콤플렉스 방법을 이용하여 자동동조함으로써 최적값을 얻어 공정의 성능을 개선한다. 최적값을 구하기 위해 개선된 콤플렉스(Complex) 방법은 기존의 최적화 이론인 심플렉스 개념을 확장, 융합함으로써 목적함수를 최소화시키는 심플렉스(Simplex)법에 제약조건이 주어지는 경우로 식 (4)의 형태의 수식을 풀기 위한 방법이다.

Minimize  $f(x)$

Subject to  $g_j(x) \leq 0, j=1,2,\dots,m$

$$x_i^{(l)} \leq x_i \leq x_i^{(u)}, i=1,2,\dots,n \quad (4)$$

여기서,  $l$ 은 하한,  $u$ 는 상한을 나타낸다.

모든 제약조건을 만족시키는  $k$ 개의 해집합  $(X_1, X_2, \dots, X_k, k \geq n)$ 을 선정한다. 일반적으로  $k$ 는  $2n$ 개를 선정한다. 그리고, 심플렉스 방법에서 투영(Reflection), 확장(Expansion), 축소(Contraction)의 기본 개념을 식 (5)와 같이 이용한다.

I) 투영(reflection) :  $x_r = x_0 + \alpha(x_0 - x_h)$

II) 확장(expansion) :  $x_e = x_0 + \gamma(x_r - x_0)$

III) 축소(contraction) :  $x_c = x_0 + \beta(x_h - x_0) \quad (5)$

개선된 콤플렉스의 수렴조건은  $X_1, \dots, X_k$ 사이의 임의의 두 점사이의 거리가 지정된 미소값 이하로 된 경우와 목적함수의 표준편차가 지정된 미소값보다 작은 경우이다. 이 경우의 표준편차는 식 (6)과 같다.

$$Q = \sum_{i=1}^n \frac{((f(x_i) - f(x_0))^2}{n+1} \leq \epsilon \quad (6)$$

### 2.2.3 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm)

공정을 수행하기 전에 설정해 주어야 하는 여러 종류의 파라미터들이 있다. 이러한 파라미터는 제어기의 성능에 민감하게 작용하기 때문에, 이 값들을 최적으로 설정해주는 것이 공정의 성능을 높이는 데 중요한 역할을 한다. 그러므로 본 논문에서 공정의 성능을 향상시키기 위하여 유전자 알고리즘으로 최적 파라미터를 설정한다. 그림 4는 유전자 알고리즘의 수행과정을 보여주고 있다.

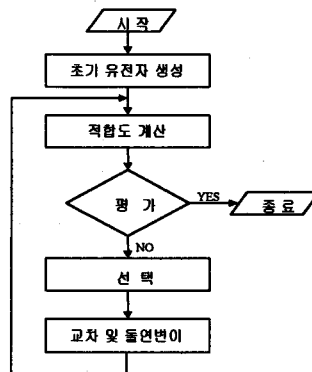


그림 4. 유전자 알고리즘의 수행 과정  
Fig 4. Flowchart of genetic algorithm

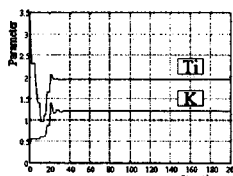
### 2.3 컴퓨터 시뮬레이션

대부분의 공정 시스템은 많은 동적요소를 가지고, 서로 다른 시정수를 가지는 High-order형이지만 이들 시스템은 1, 2계의 근사 모델로 표현할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 공정 시스템의 대상으로 단위입력에 샘플링 시간을 0.5로 정한다. 공정1은 식(7)과 같이 시간 지연을 가지는 2계 선형 공정 시스템으로 설정하고, 식(8)은 공정 2로 DC 서보 모터가 대상인 제어기를 설계하고, 각 제어 파라미터를 자동 동조 알고리즘을 통하여 구한다.

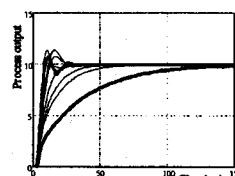
$$\text{공정 1: } \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{e^{-0.8s}}{(s+1)(s+2)} \quad (7)$$

$$\text{공정 2: } \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{0.9}{s(0.00105s^2 + 0.2104s + 0.8913)} \quad (8)$$

시스템의 성능지수는 오버슈트의 개선과 빠른 정정시간의 높은 효과를 위해 ITAE를 사용한다. 공정 1에서 그림 5(a)는 제어파라미터의 최적값으로 수렴되는 과정, (b)는 출력파형의 수렴과정, (c)는 기존의 제어기와 하이브리드 퍼지 논리 제어기의 동조된 파라미터에 의한 출력 파형을 보여주고 있다. 표 1은 공정 1에서의 제어 파라미터와 성능지수를 보여준다.



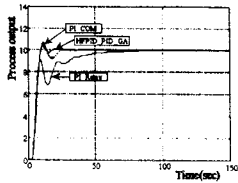
(a)



(b)

(a) 개선된 콤플렉스 방법에 의한 PI제어 파라미터의 동조과정

(b) 개선된 콤플렉스 방법에 의한 동조과정의 PI제어기 출력파형

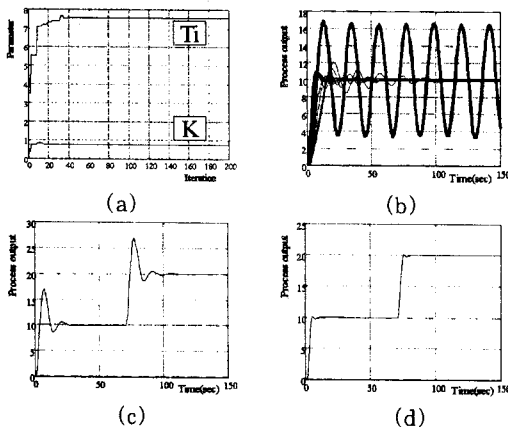


(c) 동조된 제어기의 출력파형 비교  
 그림 5. 공정 1에서 제어기의 출력  
 Fig 5. Output of controller to process 1

표 1. 공정 1에서 제어기의 파라미터와 성능지수  
 Table 1. Parameters and performance index of controller to process 1

공정		공정 1					
제어기	PI 제어기	동조방법			Relay		
동조후ITAE	56.607	K	1.651	Ti	4.675		
제어기	PI 제어기	동조방법			Complex		
초기 ITAE	168.222	동조후ITAE	34.503				
초기 파라미터		동조후 파라미터					
K	0.41	Ti	3.5	K	1.214	Ti	1.954
제어기	HFLC	동조방법			GA		
초기 ITAE	52.044	동조후ITAE	33.522				
초기 환산계수		동조후 환산계수					
K <sub>P</sub>	0.202	K <sub>I</sub>	0.062	K <sub>P</sub>	1.546	K <sub>I</sub>	0.0899
K <sub>D</sub>	3.343	GE	6.413	K <sub>D</sub>	1.588	GE	0.797
GD	4.997	GH	7.680	GD	1.558	GH	3.499
GC	8.665			GC	10.114		

그림6은 공정2에서 자동동조방법을 이용한 결과로 (a)는 개선된 컴플렉스 방법을 이용한 제어기는 초기 상태에서 파라미터 값의 변화가 몇 번의 반복 후 제어기의 파라미터를 최적값으로 수렴함을 보인다. (b)는 초기 상태에서 공정출력이 불안하다가 조정 후 점점 상승시간, 안정시간, 그리고 정상상태오차 값이 줄어들음을 보이고 있다. (c)는 릴레이 동정시 출력파형, (d)는 하이브리드 퍼지 논리 제어기의 출력파형을 보인다. 표 2는 제어기의 최적 파라미터와 성능지수를 보여준다.



(a) 개선된 컴플렉스 방법에 의한 PI제어 파라미터의 동조과정  
 (b) 개선된 컴플렉스 방법에 의한 동조과정의 PI제어기 출력파형  
 (c) 릴레이 자동동조방법에 의한 PI제어기의 출력파형  
 (d) 유전자 알고리즘에 의해 동조된 HFLC제어기의 출력파형

그림 5. 공정 2에서 제어기의 출력  
 Fig 5. Output of controller to process 2

표 2. 공정 2에서 제어기의 파라미터와 성능지수  
 Table 2. Parameters and performance index of controller to process 2

공정		공정 2					
제어기	PI 제어기	동조방법			Relay		
동조후ITAE	37.251	K	0.743	Ti	3.4		
제어기	PI 제어기	동조방법			Complex		
초기 ITAE	49.354	동조후ITAE	31.103				
초기 파라미터		동조후 파라미터					
K	0.41	Ti	3.5	K	0.799	Ti	7.563
제어기	HFLC	동조방법			GA		
초기 ITAE	298.734	동조후ITAE	17.188				
초기 환산계수		동조후 환산계수					
K <sub>P</sub>	2.629	K <sub>I</sub>	0.391	K <sub>P</sub>	0.631	K <sub>I</sub>	0.067
K <sub>D</sub>	0.538	GE	1.417	K <sub>D</sub>	0.433	GE	0.0488
GD	3.460	GH	2.551	GD	2.699	GH	4.644
GC	0.381			GC	9.407		

### 3. 결 론

본 논문에서 체계적이고 효율적인 자동동조알고리즘을 이용한 하이브리드 퍼지 제어기를 제안하였다.

첫째, 시스템의 제어입력이 퍼지변수에 의해 과도상태에서 FLC(Fuzzy Logic Controller)의 출력과 정상상태에서 PID출력의 컨벡스(convex)결합으로 구성되어 있는 하이브리드 퍼지 제어기를 제안하였다.

둘째, 제어파라미터와 환산계수를 최적화하기 위해 릴레이 자동동조방법, 개선된 컴플렉스 방법과 유전자 알고리즘을 사용하여 최적의 제어파라미터를 동조함으로써 상승시간, 안정시간, 성능지수(ITAE)가 줄어들음을 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] Aström, K.J, "Ziegler-Nichols auto-tuners", Report TFRT-3167, Dept. of Automatic Control, Lund Inst. of Tech., Lund, Sweden.
- [3] D.E Goldberg, "Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning", Addison-wesley, 1989.
- [4] T.Terano, K.Asai and M. Sugeno, "Applied Fuzzy Systems", AP Professional, 1994.
- [5] 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.
- [6] Xian-Tu Peng, "Self-regulating PID controllers and its applications to a temperature controlling process", *Fuzzy Computing*, pp.355-364, North Holland, 1988.
- [7] 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.
- [8] Sungkwon 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.
- [9] 오성권, "퍼지모델 및 제어이론과 프로그램", 기다리출판사, 1999.