

# 퍼지제어기의 최적 설계에 관한 연구

## A Study on the Optimal Design of Fuzzy Logic Controller

노 기갑\*, 김 성호\*, 주 영훈\*, 박 진배\*\*

\* 군산대학교 제어계측공학과(Tel : +82-654-469-4706; E-mail : yhjoo@ks.kunsan.ac.kr)

\*\* 연세대학교 전기공학과(Tel : +82-2-361-2773; E-mail : jbpark@contorl.yonsei.ac.kr)

**Abstract** : In general, the design of fuzzy logic controller has difficulties in the acquisition of expert's knowledge. So, some methods that can optimize the parameters for fuzzy logic controller automatically without expert knowledge was provided. Recently, tuning method for fuzzy logic controller using genetic algorithm(GA) were proposed in many papers. However, those are tuning methods for a part or some part of fuzzy logic controller. In this paper, we proposes auto tuning method for the whole part of fuzzy logic controller, such as parameters of membership functions for antecedence and consequence parts, rule base, scaling factor and the number of rule. Finally, second order dead time plant is provided to show the advantages of the proposed method.

**Keywords** : Fuzzy logic controller, Genetic algorithm, Scaling factor, Rule base, Parameter optimization

### 1. 서 론

퍼지제어기(FLC)는 수학적으로 모델링하기가 어렵거나 강한 비선형성을 가지는 경우 또는 외부의 환경이 불확실하게 변하는 경우에 효과적인 사용된다. 또한, 제어될 플랜트의 입력과 출력의 관계가 알려져 있지 않고, 입력과 출력의 데이터와 플랜트에 대한 전문적인 지식 몇 가지만이 주어졌을 때에도 퍼지제어기의 유용성은 높다. 그러나, 이러한 퍼지제어기는 플랜트에 따라 몇몇 구성요소를 조정해야할 필요가 있다. 이때 전문가의 지식이 필요하게 되며 이러한 전문가의 지식은 습득하기가 쉽지 않다. 또한 전문가의 주관적 경험에 의해 시행 착오의 방법으로 이루어진 시스템은 시스템의 복잡도가 증가하거나 돌발적인 상황에 처했을 경우 제어 성능이 떨어지기가 쉬우며, 시스템의 구성

요소가 가장 최적의 값이라는 보장도 없다. 그러한 이유로 퍼지 시스템의 구성요소를 최적화시키기 위한 몇 가지 방법이 제안되었으며 본 논문에서는 그 중의 하나인 유전 알고리즘을 선택하였다[1]-[7].

유전 알고리즘을 이용한 퍼지 제어기의 설계는 많은 논문에서 거론 되었다. 그러나, 기존의 방법들에서의 퍼지제어기 설계는 퍼지 제어기의 구성요소중 일부 만을 동정한 형태이다 [7]-[9]. 본 논문에서는 퍼지제어기의 설계시 이와 같은 구성요소의 부분적인 최적화 방법과는 달리 퍼지제어기의 거의 모든 구성요소인 환산계수, 규칙의 전제부와 결론부의 소속함수, 규칙 베이스를 유전알고리즘을 이용하여 동시에 최적화한다. 본 논문에서 제시한 퍼지 제어기의 최적 설계 방법은 불감 시간대를 갖는 2차 지연 플랜트에 적용하여 그 우수성을 증명한다.

## 2. 퍼지제어기의 자동 동조

### 2.1 퍼지제어기

본 논문에서 사용하는 GA-FLC의 기반이 되는 두 개의 입력  $e(kT)$ ,  $ce(kT)$ 와 하나의 출력  $\Delta u(kT)$ 를 가지는 일반적인 퍼지제어기의 블록도를 그림 1에 나타내었다.

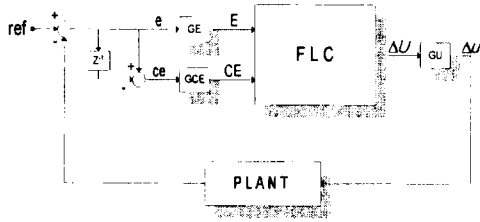


그림 1. 퍼지제어기의 블록도  
Fig. 1. Block diagram of FLC

여기에서  $e(kT)$ 는 플랜트의 출력  $y(kT)$ 과 기준 신호  $r(kT)$ 와의 오차를 의미하고,  $ce(kT)$ 는 오차의 변화율을 나타낸다. 유전알고리즘은 환산계수  $de$ ,  $dce$ 와 퍼지 제어기의 구성 요소인 전제부 결론부의 소속함수의 매개변수와 규칙 베이스를 동조한다. 이러한 퍼지 제어기의 수식적 정의는 다음과 같다.

$$e(kT) = r(kT) - y(kT) \quad (1)$$

$$ce(kT) = e(kT) - e((k-1)T) \quad (2)$$

$$\Delta u(kT) = FLC[e(kT)*GE, ce(kT)*GCE] \quad (3) \\ = FLC[E(kT), CE(kT)]$$

식 (3)에서 FLC는 퍼지 제어기를 의미하며 GE와 GCE는 입력  $e(kT)$ ,  $ce(kT)$ 의 환산 계수, GU는 출력  $\Delta u(kT)$ 의 환산 계수이다. 본 논문에서 사용하는 퍼지 제어 규칙은 식 (4)과 같은 간략화 퍼지 추론 규칙이다.

$$R^i: \text{If } E \text{ is } \Lambda_{1i} \text{ and } CE \text{ is } \Lambda_{2i}, \\ \text{Then } \Delta u \text{ is } w_i \quad (i=1, \dots, m) \quad (4)$$

식 (4)에서  $R^i$ 는 퍼지 제어기의  $i$ 번째 규칙,  $\Lambda_{1i}$ 와  $\Lambda_{2i}$ 는 전제부의 소속함수이며  $w_i$ 는 실수치로 표현되는 결론부의 소속함수이다. 전제부의 소속함수는 중심으로부터 좌우 꼭지점까지의 길이가 서로 다른 부등변 삼각형 함수를 사용한다. 이 소속 함수를 결정하는 요소는 왼쪽 꼭

지점( $a$ ), 중심( $\beta$ ), 오른쪽 꼭지점( $\gamma$ )이며 식 (5)와 같이 정의 된다.

$$\Lambda(u; a, \beta, \gamma) = \begin{cases} \frac{u-a}{\beta-a} & a \leq u \leq \beta \\ \frac{\beta-u}{\beta-a} & \beta \leq u \leq \gamma \\ 0 & u > \gamma \text{ or } u < a \end{cases} \quad (5)$$

입력에 대한  $i$ 번째 규칙의 적합도  $\mu_i$ 는 식 (6)과 같이 구하며 최종 추론값은 식 (7)과 같은 무게 중심법을 사용한다.

$$\mu_i = \Lambda_{1i}(E) \times \Lambda_{2i}(CE) \quad (6)$$

$$y^* = \frac{\sum_{i=1}^m \mu_i w_i}{\sum_{i=1}^m \mu_i} \quad (7)$$

### 2.2 유전알고리즘

유전 알고리즘은 자연 선택을 통한 적자생존이라는 진화의 원리를 이용하여 확률적인 방법으로 최적해를 찾아가는 최적화 기법중의 하나이다. 유전 알고리즘은 풀고자 하는 문제에 대한 가능한 해들을 염색체(chromosomes)로 표현하여 이들을 점차 변형해 나감으로써 점점 더 좋은 해들을 생성해나간다. 여기에서 각각의 가능한 해를 하나의 개체로 본다. 이 개체는 보통 하나 또는 여러개의 염색체로 구성되며 이 개체들의 집합을 개체군(population)이라 한다. 각 개체들은 몇가지 연산자에 의해 변형이 되는데 이 연산자들을 유전 연산자라 하며 다음과 같다. 본 논문에서 사용되는 유전연산자는 재생 연산자(reproduction), 교차 연산자(crossover), 돌연변이 연산자(mutation)이다. 본 논문에서는 실수 코드와 정수 코드를 이용하므로 일정한 정수나 실수를 더하거나 빼는 것으로 돌연변이를 행한다.

### 2.3 유전 알고리즘에 의한 퍼지제어기 설계

본 논문에서 제안하는 GA 퍼지 제어기의 블록 다이어그램은 그림 2와 같다. 이는 2.1에서 설명하였던 일반적인 퍼지제어기에 유전 알고리즘 부분을 추가한 구조를 하고 있다. 본 논문에서는 유전 알고리즘을 사용하여 제어기의 성능에 도움이 되지 않는 규칙은 제거하고, 필요한 규칙만을 남겨 놓는 방법으로 규칙 베이스를 최적화시키는 것과 동시에 제어기가 최적

의 성능을 내기 위한 환산 계수, 전제부 및 결론부 소속함수의 매개변수를 동조한다

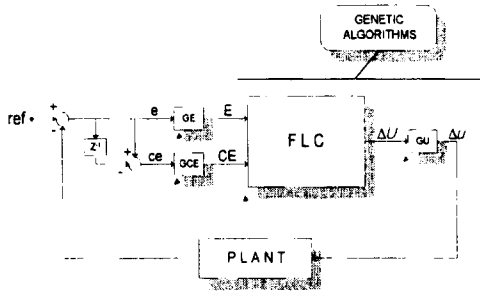


그림 2. GA-퍼지제어기의 블록도  
Fig. 2. Block diagram of GA-FLC

이러한 목적을 위해서는 퍼지제어기 규칙, 전제부 소속함수의 매개변수, 후반부 소속함수의 매개변수, 환산 계수와 같은 퍼지제어기의 요소들을 하나의 염색체로 표현하는 부호화 기법을 제안한다. 염색체는 실수 스트링을 사용하여 표현하며 염색체의 길이는 퍼지 제어기의 입력 변수가  $n$ 개, 출력 변수가 1개인 MISO 시스템인 경우, 전제부의  $i$ 번째 입력 변수의 분할 수가  $m_a$ 개, 각 소속함수를 표현하는데 필요한 매개 변수의 수를  $p$ 개라 하면 전제부 스트링의 총 길이는  $n \times m_a \times p$ 가 된다. 결론부의 경우 분할 수가  $m_c$ 개, 소속함수는 실수이므로 매개 변수는 1개가 되고 결론부 스트링의 총 길이는  $m_c \times 1$ 이 된다. 또한 rule base를 염색체로 표현하는데에는 입력 변수의 수가  $n$ 개 이므로  $\prod_{i=1}^n m_i$ 이 된다. 본 논문에서 제안한 2개의 입력과 1개의 출력을 가지고, 입력과 출력이 모두 7개로 분할된 퍼지제어기의 염색체 길이는 전제부의 경우  $2 \times 7 \times 3$ , 결론부의 경우  $7 \times 1$ , 규칙 베이스는  $7 \times 7$ 이고 각 염색체의 표현은 그림 3과 같다. 그림 3에서 전제부의 각 소속함수의 파라미터인 왼쪽 꼭지점, 중심점, 오른쪽 꼭지점이 차례로 염색체로 구성 되며, 이어서 결론부 소속함수가 구성되며, 그다음에는 규칙베이스가 염색체로 구성된다. 규칙베이스에는 결론부의 소속함수 번호가 들어가게 되고 여기에 규칙의 사용/비사용을 결정하는 규칙베이스와 동일한 길이의 이진 스트링이 덧붙여지게 된다. 마지막

으로 스텀링 팩터가 염색체가 구성된다. 이렇게 구성된 염색체는 하나의 긴 염색체를 구성하며 이 염색체를 사용하여 유전 알고리즘이 수행된다. 새롭게 생성된 개체들로 모두 같은 구조를 따르며, 각 개체를 평가할 때에는 염색체로 부호화할때와 반대로 염색체를 해독하여 퍼지 제어기의 매개변수를 추출하고 추출된 매개 변수에 의해 구성된 퍼지 제어기를 이용하여 평가하게 된다.

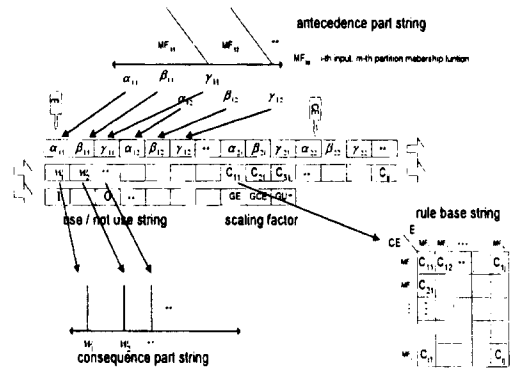


그림 3. FLC의 설계를 위한 염색체의 구조  
Fig. 3. Chromosomes for the design of the FLC

각 개체의 적합도(fitness)를 평가하는 적합함수는 보통 풀고자 하는 최적화 문제의 목적함수나 다른 주관적 평가 함수에 기본하여 결정된다. 본 논문에서는 식 (8)과 같은 목적함수를 이용한 식 (9)를 적합도 함수로 정한다.

$$x = \sum_{n=0}^{\text{sampling numbers}} \{nT \cdot e_n^2 + nT \cdot ce_n^2\} \quad (8)$$

$$f_{\text{fitness}}(x) = \begin{cases} 0 & \text{null-set exists} \\ \frac{1}{x} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

식 (8)에서  $T$ 는 샘플링 주기,  $e$ 는 플랜트의 출력과 기준 신호간의 오차,  $\Delta e$ 는 오차의 변화율이다. 식 (8)은 퍼지 제어기가 기준 신호에 빨리 도달하고 정상 상태 오차가 최소가 될 때, 적합도 함수가 최대의 값을 갖는다. 임의의 개체가 제어 규칙을 형성시 공집합을 가질 때에는 유용하지 않은 규칙을 가진 개체의 생성을 막기 위하여 식 (9)와 같이 적합도의 값에 0을 부과하는 방법을 사용한다. 이는 다음세대에는

그 객체가 생존할수 없음을 의미한다.

### 3. 시뮬레이션 및 결과고찰

본 논문에서 제안한 퍼지 제어기의 자동 동조 기법의 평가를 위한 플랜트로써 식 과 같은 불감 시간대를 갖는 2차 지연 플랜트를 사용한다.

$$G_p(s) = \frac{Kw_n^2}{s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2} e^{-Ls} \quad (10)$$

식 (10)에서  $w_n(>0)$ 은 각속도,  $\zeta(>0)$ 는 댐핑 계수(damping factor),  $L$ 은 시간 지연(time delay),  $K$ 는 이득(gain)을 나타낸다.  $w_n$ 은 시간 스케일에만 영향을 미치며  $\zeta$ 는 응답에 영향을 미친다. 시뮬레이션을 위한 파라미터는  $\zeta=0.75$ ,  $w_n=10$ ,  $L=0.12$  로 설정한다. 시뮬레이션 초기 파라미터 표 1과 같이 설정하였다.

본 논문에서 제안하는 유전알고리즘을 이용한 자동동조 방법에 의하여 최종적으로 동정된 퍼지 제어기의 전제부와 결론부의 매개변수는 표 2에 나타내었으며 규칙베이스는 표 3에 나타내었다. 표3에서 어두운 색으로 표시된 부분은 규칙 베이스에서 제외된 규칙이다. 표에서 밝은 색으로 표시된 부분 즉 유효한 규칙의 개수는 초기의 규칙수인 49개에서 30개로 크게 감소되었다는 것을 보여준다. 동정된 스캘링 팩터는 표 4에 나타내었다. 본 논문에서 사용한 FLC는 입력과 출력의 범위가 모두 -1.0~1.0이다. 스캘링 팩터는 FLC로의 입력과 출력이 범위에 맞게 조절해 주는 역할을 한다.

표 1 시뮬레이션을 위한 초기 파라미터  
Table 1 Initial parameters for simulation

PARAMETER	VALUE
Sampling number	1000
Population size	100
Number of generation	200
Probabilities of crossover	0.95
Probabilities of mutation	0.2

표 2. 동정된 소속 함수의 매개 변수  
Table. 2 Identified membership parameters

	$E(k)$			$CE(k)$			$J(U(k))$
	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$w$
NB	-1.3333	-1	-0.7243	-1.3333	-1	-0.5336	-0.3587
NM	-1.2645	-0.8737	0.0519	-1.3239	-0.3539	-0.1689	-0.2833
NS	-0.7539	-0.0508	0.5105	-0.4655	-0.1298	0	-0.1019
ZE	-0.3523	0	0.6771	-0.0921	0	0.611741	0
PS	-0.0024	0.1987	0.4983	0.1749	0.6778	0.8010	0.1665
PM	0.0362	0.0936	1.1923	0.3285	0.7046	1.1625	0.3885
PB	0.9428	1	1.3333	0.9053	1	1.3333	0.8172

표 3. 동정된 퍼지 규칙 베이스  
Table. 3 Identified fuzzy rule base

		$E(\text{error})$							
		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	
$CE$	NB	PB			PM		NS	PS	
	NM	NS	NS	NM	NM	PM		PB	
	NS			ZE	ZE			PM	NS
	ZE	NB	PM	PS	ZE	PB		PB	
	PS			PM	NB		NS	ZE	PS
	PM	PS				PB			NM
	PB		PS	PS				ZE	PB

표 4. 동정된 스캘링 팩터  
Table. 4 Identified scaling factors

GE	GCE	GU
0.91961	13.6723	10.9531

그림 4는 2차 지연을 갖는 비선형 시스템의 시뮬레이션 결과로써 수동설정시의 FLC의 성능은 점선으로, 본 논문에서 제안한 GA-퍼지 제어기의 성능은 실선으로 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 제안된 GA-퍼지제어기는 수동 동정시의 FLC보다 상승시간이 더 짧으며 최대 오버슈트 또한 상당히 작다는 것을 알수 있다. 표 5는 수동으로 동정한 FLC와 유전알고리즘을 이용한 퍼지제어기의 성능 비교를 위해 MSE(mean squares error)값을 비교한 것으로써 수동으로 동정한 FLC에 비하여 본 논문에서 제안한 GA 퍼지 제어기에 의한 MSE이 상당히 작음을 알수 있다.

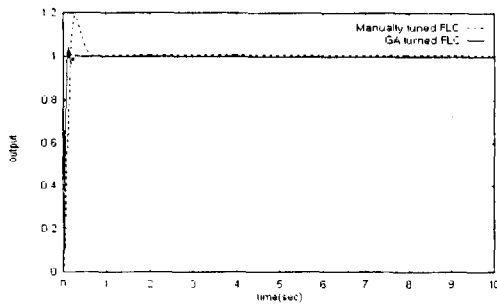


그림 4. 비선형 시스템의 출력  
Fig. 4 The output of nonlinear system

표 5. 성능비교  
Table. 5 Performance comparison

	Manually tuned FLC	GA tuned FLC
MSE	0.007626	0.003741

#### 4. 결 론

본 논문에서는 퍼지제어기의 최적설계를 위하여 유전알고리즘을 이용한 자동 동조 방법을 제안하였다. 제안된 기법은 기존의 퍼지 제어기의 구성요소의 일부분만이 아니라 환산 계수, 진제부 소속함수, 규칙 베이스, 결론부의 소속함수, 규칙수등 FLC의 모든 요소의 최적화를 동시에 동정하는 것이 가능하게 한다. 제안된 방법의 효율성 및 우수성을 평가하기 위하여 2차 시간 지연을 갖는 플랜트에 적용하였다. 그 결과 본 논문에서 제안한 방법을 사용함으로써 새로운 플랜트에 대한 제어를 설계할 때 전문가의 개입없이 우수한 성능을 가진 제어기로 동조됨을 증명하였다.

#### 참 고 문 헌

[1] Shihuang SHAO, "Fuzzy Self-Organizing Controller And Its Application for Dynamic Processes", Fuzzy Sets and Systems, Vol. 26, pp. 151-164, 1988,

- [2] C. G. Moore and C. J. Harris, "Aspects of Fuzzy Control and Estimation", Advances in Intelligent Control, pp. 201-242, 1994
- [3] Shin-ichi Horikawa et al(1990), "A Fuzzy Controller Using A Neural Network And It's Capability To learn Control Rules", Proceedings of the International Conference on Fuzzy Logic & Neural Networks, pp.103-106
- [3] David E. Goldberg, Genetic Algorithms in Search, Optimization & Machine Learning, Addison-Wesley Publishing Company, 1990.
- [4] Y. Tamaguchi, T. Takagi, and T. Mita, "Self-organizing Control Using Fuzzy Neural Networks", Advancec in Intelligent Control, pp. 337-361, 1995.
- [5] Yie-Chien Chen, Ching-Cheng Teng, "A Model Reference Control Structure Using a Fuzzy Neural Network", Fuzzy Sets and Systems, Vol 73, pp. 291-312, 1995
- [6] Cuck Kar, "Genetic Algorithms for Fuzzy Controllers", AI EXPERT, pp. 26-35, February, 1991
- [7] Hung-Ching Lu et al(1996),"Fuzzy Logic Controller Design Using Genetic Algorithm", IIZUKA '96', pp. 525-528, 1996.
- [8] Chuck Karr, "Genetic Algorithms for Fuzzy Controllers", AI EXPERT, pp. 26-35 February, 1991.
- [9] Y. H. Joo, H. S. Hwang, K. B. Kim and K. B. Woo, "Fuzzy System Modeling by Fuzzy Partition and GA Hybrid Schemes", Fuzzy Sets and Systems, Vol 86, pp 279-288, 1997. 3.
- [10] 장욱, 손유석, 박진배, 주영훈, "유전 알고리즘을 이용한 퍼지 제어기의 최적화", 전기학회 하계학술대회 논문집 B, pp:1158-1160, 1996, 7.