

## 중속 퍼지 제어기 설계

정 경 권, 류 태 옥, 임 기 환, \*이 정 훈, \*\*이 용 구, \*\*\*손 동 설  
동국대학교, \*호서전산전문학교, \*\*한림정보산업대학, \*\*\*유한대학  
전화 : 02-2260-3332

### Design of Cascaded Fuzzy Controller

Kyung Kwon Jung, Tae Uk Ryu, Ki Hwan Eom,  
\*Jung Hoon Lee, \*\*Yong Gu Lee, \*\*\*Dong Seol Son  
Dongguk University, Hoseo Computer Technical College,  
\*\*Hallym College of Information & Industry, \*\*\*Yuhan College  
E-mail : kwon@dongguk.edu

#### Abstract

In this paper, a cascade fuzzy control method is proposed, which presents a robustness of the effect of the disturbances, and in which the number of rules of the controller increase linearly instead of exponentially with the number of input variables. The proposed fuzzy control method is composed of cascade structure. Each stage has a state and a change of state, and one consequent control variable, and previous consequent control variable is an input of next stage. Simulation of the proposed controller, which is applied to the linear and nonlinear system as SISO (single-input single-output) system, showed that the proposed control method has a good control performance and robustness of disturbances compared with a conventional fuzzy control method.

그러나 퍼지 제어 방식은 기존의 제어방식에 비해 유연한 제어 성능을 발휘하고 있으나 최적규칙의 선정 및 제어변수의 양자화 레벨 선정 등에 있어서 문제점이 있다. 또한 외란이나 주위 환경에 의해서 스케일 팩터가 너무 작은 경우에는 외란에 대한 강인성이 떨어지고 너무 클 경우에는 오히려 불안정하게 되는 문제가 발생하게 되어 알맞은 스케일 팩터의 선정도 문제점이다. 또한 퍼지제어기를 설계할 때 입력변수들이 증가하면 퍼지 제어규칙의 수가 지수 함수적으로 증가하므로, 다변수 시스템과 같은 큰 규모의 시스템이나, 우수한 제어성능을 얻기 위한 제어기 입력 변수들의 증가는 매우 복잡한 퍼지제어 알고리즘을 초래한다 즉 컴퓨터에 많은 데이터 베이스 처리를 요구하게 되고, 메모리에 과부하가 걸리게 되며, 더 많은 계산 시간을 요구하게 된다.

따라서 본 논문에서는 외란에 영향을 받지 않는 강인성을 갖고, 퍼지제어기의 입력변수의 증가에 대한 퍼지제어 알고리즘의 복잡성을 해결하기 위한 새로운 퍼지제어 방식을 제안한다. 제안한 방식에서는 외란에 대하여 기존의 퍼지 제어 방식 보다 강인한 제어성능 갖고, 퍼지제어기의 입력 변수들의 증가에 대하여 제어규칙의 수가 지수 함수적으로 증가하지 않고 선형적으로 증가하는 중속 퍼지 제어 방식(Cascade Fuzzy Control Method)이다[1][2][3][4][5]

제안된 제어방식은 오차와 오차의 변화 분의 두 개의 입력변수와 한 개의 출력변수를 갖는 일반적인 퍼지제어기를 여러 단 중속적으로 접속하는 방식으로, 앞단의 출력은 다음 단의 입력으로 사용된다.

제안된 제어방식에 대한 유용성을 입증하기 위해 단일 변수 시스템으로 선형시스템, 비선형시스템을 제어대상으로 하여 기존의 일반적인 퍼지 제어 방식과 제안된 제어방식을 적용하여 제어성능을 비교 검토한다.

#### I. 서론

1973년에 K. Astrom은 불확실한 수학적 모델을 갖는 제어대상의 입출력 데이터를 사용하여 시스템을 식별하고, 식별된 제어대상에 대한 정보를 가지고 제어기를 설계하는 자기동조 적응제어기법을 제안한 이래 약 10여 년간 불확실한 제어대상에 대한 제어시스템을 설계하기 위하여 적응 제어 기법에 대한 연구가 활발하였으나 외부 외란에 민감하여 강인성을 갖지는 못하였다.

또한 1963년 L.A. Zadeh 교수가 의사결정 인공지능 알고리즘인 퍼지 논리시스템을 제안한 이래, 1974년 Mamdani가 퍼지 논리 시스템을 모형 증기기관의 제어에 성공적으로 적용한 이래로 최근까지 퍼지제어에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

#### II. 제안하는 중속 퍼지 제어 방식

일반적으로 퍼지 제어에 대하여 수행되어온 대부분의 연구는 단일변수 시스템 제어이며, 제어기 입력변수는 오차와 오차의 변화 분, 이에 대한 제어규칙, 한 개의 출력 제어변수를 갖는다. 이러한 제어기 설계방식을 다변수 시스템에 적용 할 경우에 각각의 입력변수에 대한 오차와 오차의 변화 분, 각각의 입력변수에 대응하는 제어규칙, 여러 개의 출력으로 구성이 되어 있다. 이러한 다변수 퍼지제어는 더 많은 상태 변수들의 결합에 의한 단일 변수인 경우를 확장한 것으로 볼 수 있으며, 이것을 다중 추론(multiple inference)제어라고 한다. 이러한 퍼지 제어 방식에서는 각각 추가된 변수에 대하여 제어규칙의 수가 지수 함수적으로 증가하게 되어, 컴퓨터에 데이터 베이스, 메모리 용량, 계산 시간 등을 더 많이 요구하게 된다. 이러한 문제에 대처하기 위한 효과적인 방법이 본 연구에서 제안하는 종속 퍼지 제어방식이다. 제안된 제어방식에서는 제어규칙의 수가 지수 함수적으로 증가하지 않고 선형적으로 증가하게되어 제어기 설계과정이 간단하고 알고리즘이 단순화된다.

그림 1은 m 단(stage)을 갖는 종속 퍼지 제어기의 블록선도이다. 그림 1에서  $x_0, x_1, \dots, x_m$ 은 종속 퍼지 제어기의 입력,  $y_1, y_2, \dots, y_m$ 은 종속 퍼지 제어기를 구성하는 각 단계 퍼지제어기 출력이며 각 단계의 퍼지 제어기는 두 개의 입력과 한 개의 출력을 갖는다. 본 논문에서는 2단 결합 종속 퍼지 제어 방식을 사용한다. 여기서는 일반성을 나타내기 위해 m 단계를 갖는 종속 퍼지 제어기를 설명한다.

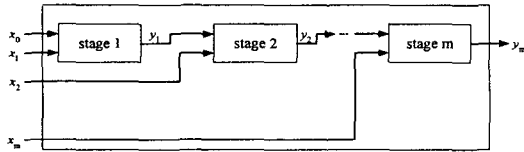


그림 1. 제안된 종속 퍼지 제어기

각 단계에서 퍼지 제어 규칙은 식 (1)로 표현된다.

- Stage 1:  
 IF  $x_0$  is  $A_1^1$  and  $x_1$  is  $A_1^1$  THEN  $y_1$  is  $B_1$   
 ...  
 IF  $x_0$  is  $A_n^1$  and  $x_1$  is  $A_n^1$  THEN  $y_1$  is  $B_n$   
 Stage  $i(i=2,3,\dots,m)$ :  
 IF  $y_{i-1}$  is  $A_i^1$  and  $x_i$  is  $A_i^1$  THEN  $y_i$  is  $B_i$   
 ...  
 IF  $y_{i-1}$  is  $A_n^i$  and  $x_i$  is  $A_n^i$  THEN  $y_i$  is  $B_n$

제안된 그림 1의 종속 퍼지 제어기에서 제어기를 구성하는 각 단계에서의 퍼지제어기에 대한 스케일링 팩터는 입력변수의 최대값이 1이 되도록 설정하고, 최종 출력 스케일링 팩터는 제어대상의 물리적인 제한(physical limitations)의 특성에 의해 초기화된다.

그림 2는 제안된 종속 퍼지 제어기를 갖는 단일 변수 시스템과 다변수 시스템의 퍼지 제어 시스템의 구성도이다.

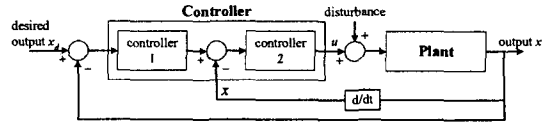


그림 2. 단일변수 시스템의 제안된 종속 제어 방식의 구성도

### III. 시뮬레이션

제안된 종속 퍼지 제어 방식의 유용성과 많은 분야의 제어대상에 적용 가능함을 입증하기 위해 단일 변수 시스템으로 선형, 비선형 시스템에 제안된 제어방식과 기존의 퍼지 제어 방식과 비교 검토한다. 시뮬레이션은 선형, 비선형 시스템을 제어대상으로 각각 가동코일형 선형 직류 전동기, 단일링크 매니플레이터를 시스템으로 선정하여 IBM-PC 586상에서 C-언어로 한다. 시뮬레이션 조건은 동일하게 0.1 [ms]의 스텝사이즈, 삼각형 소속 함수, 퍼지추론과 비퍼지화 방식을 사용하며, 기존의 퍼지 제어 방식은 우수한 제어성능을 얻을 수 있는 표 4.1의 49개의 퍼지 제어 규칙을 사용한다.

여기서 NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB는 각각 Negative Big, Negative Medium, Negative Small, Zero, Positive Small, Positive Medium, Positive Big을 나타내는 언어 변수이다.

표 1. 49개의 퍼지 제어 규칙

e	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZE
NM	NB	NB	NM	NM	NS	ZE	PS
NS	NB	NM	NM	NS	ZE	PS	PM
ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PM	PB
PM	NS	ZE	PS	PM	PM	PB	PB
PB	ZE	PS	PM	PB	PB	PB	PB

#### 3-1 선형 시스템 제어를 위한 종속 퍼지 제어 방식

제안된 제어방식을 선형시스템에 적용하기 위하여 최근 각종 사무 자동화기기 등의 소형 기기 자동화에 많이 사용되고 있는 가동코일형 선형 직류 전동기를 제어대상으로 시뮬레이션을 한다. 식 (2)는 가동코일형 선형 직류 전동기의 상태공간 모델이다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{1}{T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ k_m \end{bmatrix} v$$

$$T = \frac{R m}{k_e k_f}, \quad k_m = \frac{1}{k_e} \quad (2)$$

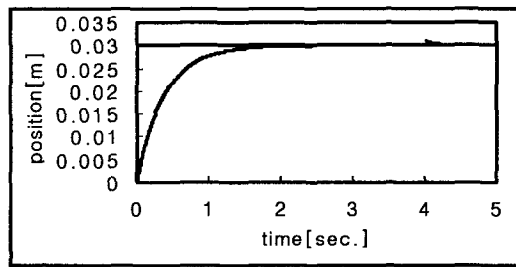
## 중속 퍼지 제어기 설계

여기서  $x_1, x_2$  는 가동 코일형 선형 직류전동기의 위치 및 속도를 나타내는 상태변수,  $R, m, k_e, k_f$  는 각 가동자 코일의 저항, 질량, 역기전력상수, 추력상수,  $v$ 는 가동코일형 선형 직류전동기에 가해지는 전압이다. 아래의 표 2는 식 (2)의 가동 코일형 선형 직류전동기의 사양이다.

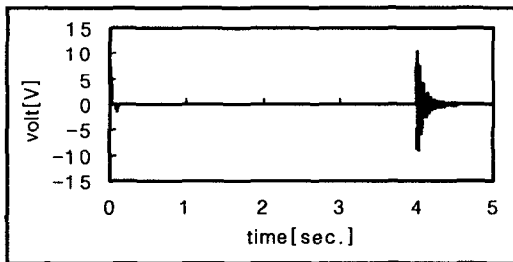
표 2 가동 코일형 선형 직류 전동기의 사양

전원전압	V	6	[V]
추력	F	0.7	[N]
속도	v	2	[m/s]
자속밀도	B	0.12	[Wb/m <sup>2</sup> ]
가동거리	X	0.4	[m]
가동자의 질량	M	0.03	[Kg]
가동자코일의 저항	R	6.73	[Ω]
역기전력 상수	K <sub>e</sub>	1.5	[Vs/m]
추력상수	K <sub>f</sub>	0.152955	[Kgf/A]

표 2의 사양을 갖는 식 (2)의 제어대상에 대한 위치 제어의 조건은 초기값 = 0[m], 목표값 = 0.03[m] 이고, 4[sec]에서 외란을 주고 0[sec]에서 5[sec] 동안 시뮬레이션 한 결과는 그림 3과 그림 4이다.



(a) set-point 제어 응답 곡선

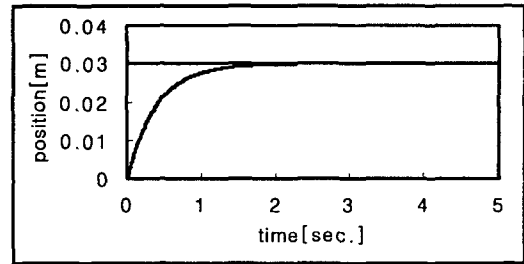


(b) 제어입력신호

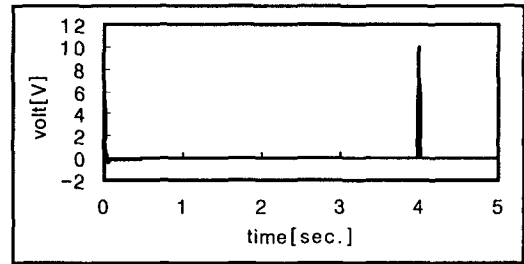
그림 3. 49개의 제어규칙을 갖는 기존의 퍼지 제어 방식

그림 3은 표 1에 주어진 49개의 퍼지 제어 규칙 갖는 기존의 퍼지 제어 방식으로 그림 3(a)는 0.03[m]의 원하는 기준입력에 대한 set-point 제어 응답 곡선이고, 그림 3(b)는 이때의 제어입력신호이다. 그림 3(b)를 조사하면 4[sec.] 근처에서 제어입력신호의 큰 변화가 보이며, 이것은 외란에 대한 기존의 퍼지 제어 방식의 강인성을 조사하기 위하여 4[sec.]에 10[V]의 외란을 가한 결과이다. 이 때의 제어성능을 조사하기 위하여 그림 3(a)를 보면,

4[sec.] 부근에서 오차가 발생함을 볼 수 있다.



(a) set-point 제어 응답 곡선



(b) 제어입력신호

그림 4. 제안된 중속 퍼지 제어 방식

그림 4는 제안된 중속 퍼지 제어 방식의 set-point 제어 응답 곡선과 제어 입력 신호이다. 그림 3에서와 동일하게 제안된 제어방식의 강인성을 조사하기 위하여 4[sec]에서 10[V]의 외란을 가하였다. 그림 4(b)의 제어입력신호가 4[sec.]에서 큰 값을 갖는 것은 외란에 의한 영향이며, 이때의 set-point 제어성능을 나타내는 그림 4(a)에서는 4[sec.] 부근에서 외란에 대한 영향을 전혀 받지 않는 강인성이 우수한 결과를 보이고 있다.

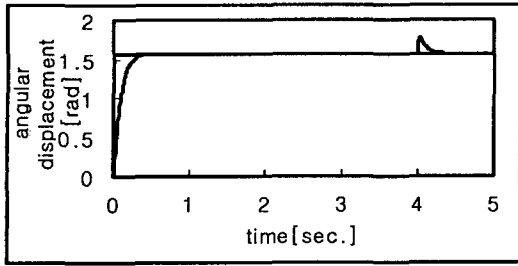
### 3-2. 비선형 시스템 제어를 위한 중속 퍼지 제어 방식

비선형 시스템 제어에 제안한 제어방식에 대한 타당성을 입증하기 위하여 식(3)으로 표현되는 단일 링크 매니플레이터에 대하여 시뮬레이션 하여 표 3의 제어규칙을 갖는 기존의 퍼지 제어 방식 제안된 제어방식의 set-point 제어성능 및 강인성을 각각 비교 검토한다.

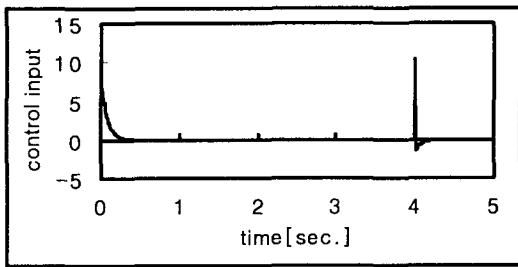
$$ml^2 \ddot{\theta} + \delta \dot{\theta} + mgl \cos(\theta) = \tau \quad (3)$$

여기서  $\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}$  는 각각 매니플레이터의 각변위, 각속도, 각가속도를 나타내고,  $\tau$  는 매니플레이터의 입력으로서 관절에 가해지는 토크이며  $m, l, \delta, g$  는 각각 매니플레이터 링크의 질량, 길이, 마찰계수, 중력가속도이며, 각각  $m=0.2[\text{kg}], l=0.15[\text{m}], \delta=0.4[\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}], g=9.8[\text{m}/\text{s}^2]$ 의 사양을 갖는다.

단일 링크 매니플레이터의 초기값은 0[rad] 이고, 원하는 기준 값을  $\pi/2[\text{rad}]$ 로 주고, 4[sec]에서 외란을 주고, 0[sec]에서 5[sec] 동안 시뮬레이션 한 결과는 그림 5와 그림 6이다.



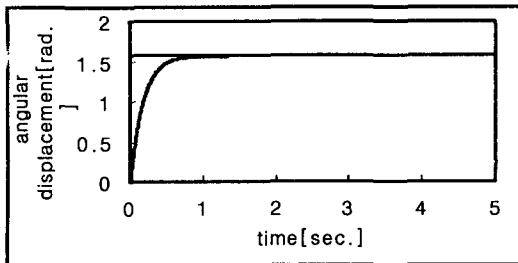
(a) set-point 제어 응답 곡선



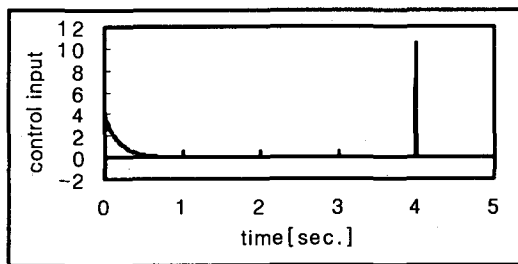
(b) 제어입력신호

그림 5. 49개의 제어규칙을 갖는 기존의 퍼지 제어 방식

그림 5는 49개의 제어규칙을 갖는 기존의 퍼지 제어 방식에 의한 시뮬레이션으로, 그림 5(a)는 set-point 제어 응답 곡선, 그림 5(b)는 이때의 제어입력신호이다. 그림 5(b)에서 보이는 것과 같이 4[sec]에서 외부의 큰 외란이 가해지고, 이때의 제어성능은 그림 5(a)에서와 같이 4[sec] 부근에서 오차가 발생함을 관찰할 수 있다.



(a) set-point 제어 응답 곡선



(b) 제어입력신호

그림 6. 제안된 종속 퍼지 제어 방식

그림 6은 제안된 종속 퍼지 제어 방식의 제어성능을 관찰하기 위하여 시뮬레이션 한 결과이다. 그림 5에서와

동일하게 제안된 제어방식의 강인성을 조사하기 위하여 4[sec]에서 외란을 가하였다. 그림 6(b)의 제어입력신호가 4[sec]에서 큰 값을 갖는 것은 외란에 의한 영향이며, 이때의 set-point 제어성능을 나타내는 그림 6(a)에서는 외란 4[sec] 부근에서 외란에 대한 영향을 전혀 받지 않는 강인성이 우수한 결과를 보이고 있다.

제안된 종속 퍼지 제어 방식은 전단 3개 후단 9개 총 12개의 퍼지 제어 규칙 가지며, 기존의 퍼지 제어 방식은 49개의 퍼지 제어규칙을 가지므로 제어 규칙의 수가 현저히 감소함으로 단순한 알고리즘을 가짐을 알 수 있다. 또한 제안된 방식은 기존의 방식보다 월등히 우수한 강인성을 가짐을 알 수 있다.

#### IV. 결론

본 논문에서는 제어대상에 대한 수학적 모델이 부정확하거나 미지이며, 외부 외란의 영향을 거의 받지 않고, 퍼지 제어기의 입·출력 변수들이 증가하여 컴퓨터의 데이터 베이스, 메모리 용량, 계산 시간 등을 더 많이 요구하는 문제점 등을 해결하기 위한 제어 방식을 제안한다. 제안된 종속 퍼지 제어방식에 대한 유용성을 확인하기 위하여 단일 변수 시스템으로 선형 직류 전동기, 비선형 단일 링크 매니플레이터에 적용하여 시뮬레이션하여, 기존의 퍼지 제어 방식과 비교 검토한 결과는 다음과 같다.

- 입·출력 변수들의 증가에 대하여 제어 규칙의 수가 지수 함수적으로 증가하지 않고 선형적으로 증가하므로 제어 규칙의 수가 감소하였다.
- 제어 규칙의 수의 감소로 이로 인한 알고리즘이 기존의 퍼지 제어 방식보다 간단 명료해졌다.
- 적은 제어 규칙의 수로도 우수한 제어성능을 가지며 외란에 대한 우수한 강인성을 나타내었다.

#### 참고문헌

- [1] Yongli Huang, Seiji Yasunobu, "Cascade Fuzzy Controller Using to Large Scale System", Transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan C - A Publication of Electronics, Information and Systems Society, V.119-C N.12, 1548-1553, 1999
- [2] Dr.Leonid Reznik, "Evolution of fuzzy controller design", In Processing of the IEEE International Conference on Fuzzy Systems, Vol. 2, pp.503-508, 1997
- [3] Y.Huang and S.Yasunobu, "A new practical design method of fuzzy controller for non-line process", In Processings of the 31th Conference of Technical Committee on Soft Intelligent Control, pp.24-28, 1998
- [4] Z.M.Yeh, "A cross-coupled bistage fuzzy controller for biaxis servomechanism control", Fuzzy Sets and Systems, Vol.97, pp265-275, 1997
- [5] M. A. El-Sharkawi, Siri Weerasooriya, "Development and Implementation of Self-Tuning Tracking Controller for DC Motors", IEEE Trans. Energy Conversion, vol.5, no.1, pp.122-128, 1990.