

오차적분 적용계수를 이용한 PD+I 퍼지제어기

PD+I Fuzzy Controller Using Error-Accumulating Applying Factor

전 경 한, 이 연 정, 최 봉 열

(Kyung Han Chun, Yun Jung Lee, and Bong Yeol Choi)

Abstract : In this paper, we propose a PD+I fuzzy controller using an error-accumulating applying factor. In fuzzy control, analytical study was done formerly, in which fuzzy control can be classified by PD type and PI type, and also the study for getting merits of both types was done, too. But the mixed type has a complex structure and many parameters. The proposed fuzzy controller is 2-input 2-output and PD type fuzzy control is used as a basic structure. And the proposed controller annihilates a steady-state error and improves transient responses because of using the error-accumulating applying factor which is determined in the real time along the current state of controlled process. Furthermore it is easy to tune the system because of decreasing the number of scaling factors and the I type controller with resetting resolves the integral wind-up problem. Finally we apply the proposed scheme to various plants and show the performance betterment.

Keywords : fuzzy control, mixed control, scaling factor

I. 서론

퍼지제어는 퍼지집합 이론을 제안한 미국의 Zadeh 교수가 1973년[1]에 시스템의 자동제어에 응용할 수 있음을 보인 후, 1974년에 영국의 Mamdani 교수가 스티프 엔진 제어에 최초로 응용하여 실용 가능성을 입증하였으며, 그 후에 일본에서는 Terano, Sugeno[3] 교수 등의 영향을 받아 퍼지 제어 응용품들이 많이 생산되어져 나왔다. 현재 미국에서는 NASA, Rockwell International, General Electric 등의 우주항공 및 방위산업분야에서 퍼지제어가 적용되고 있다[4][5].

특히 퍼지제어기 중에서 해석적인 연구가 많이 이루어지고 있는데 측정된 오차로부터 제어입력 자체를 구하는 형태인 PD형 퍼지제어기와 측정된 오차로부터 제어입력의 증가분을 구하는 형태인 PI형 퍼지제어기로 분류할 수 있으며 대상 시스템의 특성에 따라 선택적으로 사용한다[6]. PI형 퍼지 제어기는 비례제어 고유의 안정성과 적분제어의 정상상태 오차 제거능력으로 1차 선형 시스템에서는 성능이 만족스럽다. 그러나 전통적인 PI제어기처럼 2차 이상의 고차 시스템에서는 큰 오버슈트와 과도한 발진 등을 나타낸다[7]. 이에 반해 PD형 퍼지제어기는 파라미터 조정이 쉽고 과도상태 응답특성이 좋아 PI형 퍼지제어기의 문제점인 큰 오버슈트 발생을 억제할 수 있다. 그러나 이 역시도 특정 시스템에 대해서는 일정한 정상상태 오차를 제거하지 못하는 단점이 있다[8].

한편 퍼지제어가 "Maximum of Minimum" 또는 다른 유사한 연산방법으로 불확실한 영역에 대해 유연하고 강인한 지능적 추론을 가능하게 하는 구조를 가지고 있으므로, 최근에는 더욱 자동화된 기법들을 퍼지제어에 적용하는 추세이

다. 예로서 가변구조 제어 등의 기존 제어법칙을 이용하거나 신경망의 학습방식, 유전 알고리즘과 진화연산 등의 방식을 사용하여 안정된 제어규칙이나 최적의 제어규칙을 만드는 연구가 시도되고 있는데, 이는 각각의 제어방법이 가지는 장점을 살린 혼합형의 제어기법이 유리하기 때문이다.

최근 혼합형의 제어기법이 많이 연구되고 있으며 그 중에서도 과도상태 응답특성을 좋게 하면서 정상상태 오차를 제거하기 위해 가변구조 제어이론을 퍼지 제어에 적용한 연구가 진행되고 있다. PD형 퍼지제어기와 PI형 퍼지제어기의 장점을 가지는 제어기를 구성하기 위하여 퍼지 스위칭기구를 이용하는 방식이 제시되었으며[6] 시스템의 상태변수에 대한 가중치 퍼지함수를 도입한 퍼지 가중치 제어기도 제안되어졌다[9]. 그러나 이러한 방법은 PD형 퍼지제어기와 PI형 퍼지제어기가 함께 사용되고 이를 제어하는 새로운 퍼지제어기가 필요하여 구성이 복잡할 뿐 아니라 조정해야 할 파라미터 수가 많다.

본 논문에서는 오차적분 적용계수를 이용한 PD+I 퍼지제어기를 제안한다. 제안한 퍼지 제어기는 2입력 2출력으로 PD형 퍼지제어기를 기본 구조로 하여 과도상태 응답특성이 좋고 제어시 실시간으로 오차적분 적용계수를 이용하여 누적 오차량을 계산, 제어입력으로 사용하여 정상상태 오차를 제거한다. 특히 제안한 오차적분 적용계수의 경우 그 값이 0이 되면 누적 오차량 또한 0으로 리셋되므로 적분기의 wind-up 문제가 발생하지 않는다. 또한 지금까지 일정한 규칙이 없어서 전문가의 경험이나 시행반복법에 의해 조정되고 있는 퍼지제어기의 파라미터의 수를 최소화함으로써 시스템 조정이 용이하다. 제안한 제어기의 타당성을 보이기 위하여 0형, 1형의 2차 시스템에 대한 모의실험을 하며 과도상태 응답특성과 정상상태 오차, 그리고 IAE(Integral of Absolute Error), ITAE(Integral of Time-multiplied Absolute Error)를 적용하여 제어성능이 개선됨을 보인다.

접수일자 : 2001. 8. 16., 수정완료 : 2001. 12. 20.

전경한: 경북대학교 전자공학과(kacarot@cs1.knu.ac.kr)

이연정, 최봉열: 경북대학교 전자전기컴퓨터학부(yjlee@ee.knu.ac.kr/bchoi@ee.knu.ac.kr)

II. 오차적분 적용계수를 이용한 PD+I 퍼지제어기

PD형 퍼지제어기와 PI형 퍼지제어기의 장점을 가지면서 파라미터 수를 최소화하여 시스템 조정이 용이한 새로운 제어기를 제안한다. 제안한 제어기는 PD형 퍼지제어기를 기본 구조로 하며 과도상태 응답특성과 정상상태 오차를 개선하기 위하여 오차적분 적용계수를 이용한 I형 제어기의 새로운 구조를 가진다. 제안한 PD+I 퍼지제어기의 구조는 그림 1과 같다.

여기서 $S_e, S_{\Delta e}, S_u$ 는 스케일링 계수이고 $e, \Delta e$ 는 오차와 오차 변화량이며 (1)과 같다.

$$e(k) = r(k) - y(k)$$

$$\Delta e(k) = e(k) - e(k-1) \tag{1}$$

그리고 $r(k)$ 는 기준 신호, $y(k)$ 는 출력을 나타내며 k 는 샘플된 시간이다.

제안한 PD+I 퍼지제어기의 제어입력 $u(k)$ 은 식 (2)와 같으며 2.1절에서 u_{PD} 를 결정하는 PD형 퍼지제어기를 설명하고 2.2절에서 u_I 를 결정하는 오차적분 적용계수를 이용한 I형 제어기를 제안한다.

$$u(k) = u_{PD}(k) + u_I(k) \tag{2}$$

1. PD형 퍼지제어기

제어의 목표 값과 현재 값의 차이인 오차 와 오차 변화량

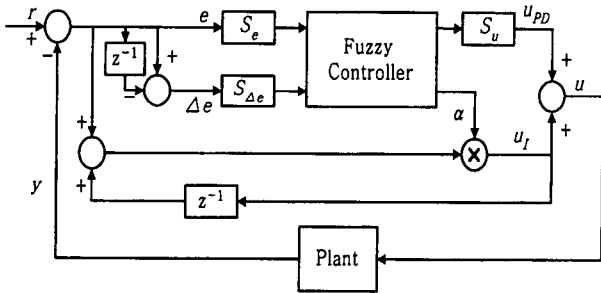


그림 1. 제안한 PD+I 퍼지제어기의 구조.
Fig. 1. Structure of proposed PD+I fuzzy controller.

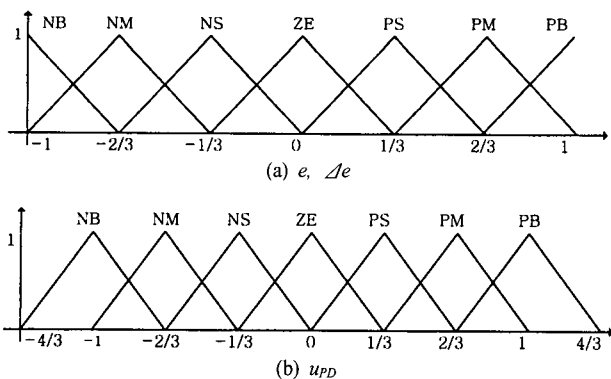


그림 2. PD형 퍼지제어기의 소속함수.
Fig. 2. Membership function of PD-type fuzzy controller.

Δe 로부터 제어입력 u_{PD} 를 구하는 PD형 퍼지제어기의 구조는 그림 1에서와 같으며 입출력 관계를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$(e, \Delta e) \rightarrow u_{PD} \tag{3}$$

PD형 퍼지제어기의 입력변수는 오차와 오차 변화량이고 출력변수는 제어입력이다. 입력변수와 출력변수의 소속함수를 그림 2와 같이 이등변 삼각형을 사용하여 정의하며 i 번째 제어규칙은 다음과 같이 기술된다. 단 여기서 n 은 오차의 멤버쉽 함수 갯수, m 은 오차 변화량의 멤버쉽 함수 갯수이다.

$$R_i : \text{If } e \text{ is } A_i \text{ and } \Delta e \text{ is } B_i,$$

$$\text{then } u_{PD} \text{ is } C_i \quad i = 1, \dots, n \times m \tag{4}$$

여기서 A_i, B_i, C_i 는 각각 그림 2에서 정의된 퍼지집합이다. 여기서 각 퍼지집합은 다음을 의미한다.

- NB=Negative Big, NM=Negative Medium,
- NS=Negative Small, ZE=Zero, PS=Positive Small,
- PM=Positive Medium, PB=Positive Big

그리고 PD형 퍼지제어기의 제어규칙은 표 1과 같다. 입력변수들은 제어규칙에 의해 출력변수와 연결되고 마지막으로 비퍼지화를 통해 실질적으로 시스템에 가해질 제어입력이 구해진다. 이 때 사용한 퍼지추론은 max-min이며 비퍼지화는 무게중심법(COG)을 사용한다.

고찰 1: PD형 퍼지제어기는 전통적인 PD제어기처럼 오차의 순간적인 기울기를 측정하고 미리 큰 오버슈트를 예측하여 실제로 오버슈트가 생기기 전에 교정효과를 제공함으로써 과도상태 응답특성중 상승시간, 오버슈트, 정정시간을 적절하게 하는 것은 가능하나 정상상태 오차문제에 대처할 수 없는 단점이 있다. 반면, PI형 퍼지제어기는 제어입력의 증가분을 구하는 형태로서 전통적인 PI제어기처럼 정상상태 오차를 개선하는 능력은 탁월하지만 2차 이상의 시스템에서는 적절한 상승시간과 오버슈트를 개선하기 어렵다[10].

이와 같은 PD형 퍼지제어기와 PI형 퍼지제어기의 장점을 가지는 제어기를 구성하여 과도상태 응답특성을 좋게 하

표 1. PD형 퍼지제어기의 제어규칙.
Table 1. Rule table for PD-type fuzzy controller.

$\Delta e \backslash e$	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZE
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZE	PS
NS	NB	NB	NM	NS	ZE	PS	PM
ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB
PM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB	PB
PB	ZE	PS	PM	PB	PB	PB	PB

면서 정상상태 오차를 제거하고자 하는 여러 가지 방법들이 시도되어 좋은 효과를 거두고 있다[6][9]. 그러나 전통적인 PID 제어기처럼 $e, \Delta e, \int e$ 를 입력으로 하여 제어출력을 내는 경우 제어성능을 향상시킬 수 있으나 퍼지제어기의 설계와 파라미터 조정의 어려움이 있다[7][11]. 또 PD형 퍼지제어기와 PI형 퍼지제어기를 적절히 조합하는 방법[6][9]도 제시되었다. 그러나 이 역시 두 퍼지제어기를 제어하기 위한 또 하나의 퍼지제어기가 존재해야 하므로 조정해야 할 파라미터 수가 많아져 현장 적용시 어려움이 있다.

2. 오차적분 적용계수를 이용한 1형 제어기

오차적분 적용계수 α 를 이용하여 제어입력 u_i 를 결정하는 1형 제어기의 제안하는 형태는

$$u_i(k) = \alpha \times (e(k) + u_i(k-1)) \quad (5)$$

이다. 이렇게 계산된 누적 오차량과 PD형 퍼지제어기의 출력을 합하여 플랜트의 제어입력 (2)로 사용함으로써 정상상태 오차를 제거하고 과도상태 응답특성을 개선한다. 그리고 프로세스의 상태에 따라 오차적분 적용계수 범위는 [0, 1]이며, 특히 0인 경우 I형 제어기 (5)가 리셋팅되므로 적분기에서 흔히 발생하는 wind-up 현상이 발생하지 않으며 과도한 오버슈트 문제도 개선할 수 있다.

제어입력 (5)에서 오차와 오차 변화량으로부터 오차적분 적용계수를 구하는 퍼지제어기는 그림 1에서와 같으며 입력 출력 관계를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$(e, \Delta e) \rightarrow \alpha \quad (6)$$

제안한 퍼지제어기는 입력변수의 경우 그림 2에서와 같이 PD형 퍼지제어기와 동일한 소속함수를 사용하므로 실제 구현에 있어 단지 하나의 퍼지화 모듈만이 필요하다. 출력변수의 경우 I형 제어기의 적용정도를 나타내는 오차적분 적용계수 α 를 구하므로 0은 OFF, 1은 ON을 나타낸다. 사용한 소속함수는 그림 3과 같다.

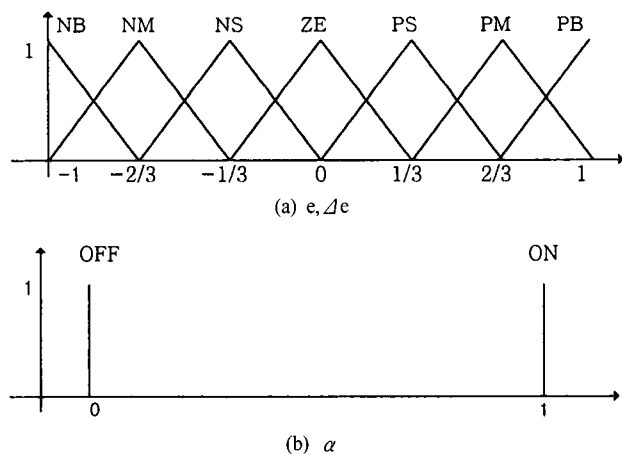


그림 3. 오차적분 적용계수의 소속함수.
Fig. 3. Membership function of error-accumulating applying factor.

표 2. 오차적분 적용계수를 위한 제어규칙.

Table 2. Rule table for error accumulating applying factor.

$e \backslash \Delta e$	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF
NM	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
NS	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
ZE	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON
PS	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	ON
PM	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	ON
PB	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	ON	ON

출력함수에 사용한 퍼지 싱글톤은 애매함이 없는 값으로 기능을 구현하기 용이하고 다른 퍼지집합과의 연산도 간단히 처리할 수 있다[12]. 그리고 오차적분 적용계수를 계산하기 위해서 제어규칙을 결정할 때 고려사항은 다음과 같다.

첫째, 오차는 존재하지만 오차의 변화가 없는 경우 오차를 제거하기 위해 오차적분 적용계수를 ON한다.

예) *If e is PS and Δe is ZE, then α is ON*

둘째, 오차가 크고 오차 변화량이 양인 경우 목표치에 빠른 도달을 위해 오차적분 적용계수를 ON한다.

예) *If e is PB and Δe is PB, then α is ON*

셋째, 목표치 부근에 도달하면 제어입력을 작게 하여 오버슈트나 언더슈트의 발생을 억제한다. 즉 오차적분 적용계수를 OFF한다.

예) *If e is ZE and Δe is NM, then α is OFF*

넷째, 오차와 오차 변화량이 반대부호이면 오차적분 적용계수를 OFF한다.

예) *If e is PS and Δe is NB, then α is OFF*

위의 사항들을 고려하고 과도상태 응답특성을 개선하기 위하여 오차적분 적용계수의 제어규칙은 표 2와 같이 정의한다.

입력변수들은 제어규칙에 의해 출력변수와 연결되고 마지막으로 비퍼지화를 통해 실질적으로 시스템에 가해질 오차적분 적용계수가 구해진다. 이때 사용한 퍼지추론은 max-min이며 비퍼지화는 무게중심법(COG)을 사용한다.

고찰 2: 제어입력 생성시 I형 제어기가 PD형 퍼지제어기의 제어입력과 합해지므로 입력변수를 위한 스케일링 계수 $S_e, S_{\Delta e}$ 는 PD형 퍼지제어기와 동일하게 고려한다. 또 출력변수를 위한 스케일링 계수는 오차적분 적용계수가 ON(1), OFF(0)으로만 결정되므로 필요하지 않다. 이를 함께 고려해보면 제안한 제어기는 PID형 퍼지제어기나 PD형 퍼지제어기와 PI형 퍼지제어기를 조합한 경우보다 조정해야 할 스케일링 계수가 작고 시스템 조정이 용이하다.

III. 모의실험

제안한 제어기를 모의실험하기 위하여 0형, 1형 계통의 2차 시스템에 적용하는데 안정한 시스템과 불안정한 시스템을 각각 예로 들며 기준신호는 단위계단 입력과 단위경사 입력을 사용한다. 사용한 플랜트는 다음과 같다.

예1: 0형 계통 안정한 2차 시스템

$$G(s) = \frac{1}{s^2 + 4s + 4}$$

예2: 0형 계통 불안정한 2차 시스템

$$G(s) = \frac{1}{s^2 - 4}$$

예3: 1형 계통 2차 시스템

$$G(s) = \frac{1}{s(s+2)}$$

예 3은 단위계단 입력에 대해 정상상태 오차가 없다고 알려져 있으나 s-평면의 원점에 고유치가 있으므로 제어하기 까다로운 시스템이며 PI 제어에 의해 진동을 유발할 수 있다[13]. 특히 단위경사 입력에 대해 PD형 퍼지제어는 정상상태 오차가 존재한다.

사용한 소속함수와 제어규칙은 그림 2,3과 표 1,2이다. 퍼지제어는 제어대상 플랜트에 따른 소속함수의 형태와 제어규칙이 제어성능을 결정하는데 여기서는 제안한 제어기의 개념 전달을 위해 모든 예에서 동일한 제어규칙과 소속함수를 사용한다. 그리고 제안한 제어기와 PD형 퍼지제어기의 성능 비교를 위하여 스케일링 계수를 동일하게 하고 실험하며 성능지수로 최대 오버슈트, 상승시간, 정정시간, 그리고 IAE, ITAE를 이용한다. 사용한 스케일링 계수는 다음과 같다.

$$S_e = 2.5, S_{\Delta e} = 35, S_u = 5 \quad (7)$$

모의실험은 MATLAB과 SIMULINK를 이용하며 샘플링 간격은 0.01을 사용한다. 모의실험에 대한 성능분석은 표 3에, 실험 결과는 그림 4-12에 나타내었다. 예 1, 2에서 PD형 퍼지제어기에서 존재하던 E_{ss} 가 제거되었으며 과도응답 특성 또한 개선되었다. 이는 제안한 제어기가 퍼지논리에 의해 누적 오차량을 제어입력에 적용하였기 때문이다. 예 1에 대한 결과로 그림 4에서 누적 오차량을 시스템의 제어입력으로 부가하였지만 프로세스의 현재 상태에 따라 퍼지논리로 제어되어 PI 제어의 문제점인 오버슈트가 발생하지 않음을 알 수 있다. 그리고 예 2의 경우 PD 제어로도 과도상태 응

표 3. 성능 분석.

Table 3. Performance analysis.

플랜트	성능 제어기	PMO (%)	T_r (sec) (0.1~0.9)	T_s (sec) \pm (2%)	IAE	ITAE	E_{ss}
		예 1	Proposed	0.00	2.86	8.05	
	PD-type Fuzzy	0.00	∞	∞			0.24
예 2	Proposed	59.63	0.33	8.01			0.00
	PD-type Fuzzy	61.43	0.34	∞			-0.27
예 3	Proposed	0.16	1.77	2.87	0.91	0.70	0.00
	PD-type Fuzzy	0.00	1.89	3.41	0.96	0.81	0.00

답을 개선할 수 있지만 상당히 큰 제어입력을 필요로 하고 PID 제어는 조정해야 할 파라미터 수가 많은 단점이 있는 반면에 제안한 제어기는 조정이 용이하면서 그림 7에서 알 수 있듯이 제어입력의 최대값 증가폭도 크지 않다. 예 3은 예

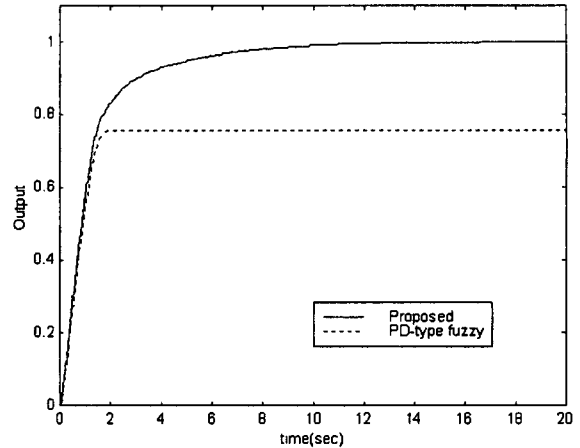


그림 4. 단위계단 응답(예 1).
Fig. 4. Unit step response(example 1).

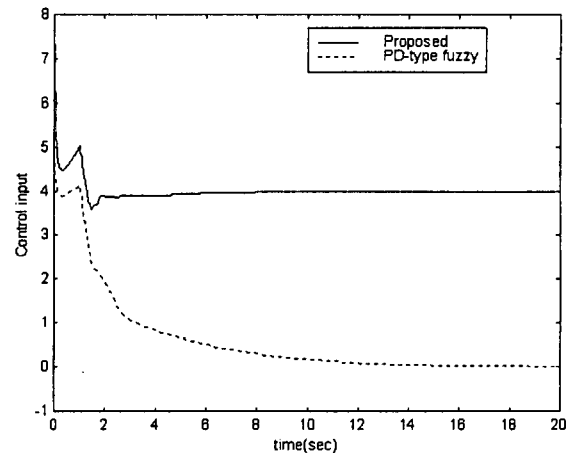


그림 5. 제어입력(예 1).
Fig. 5. Control input(example 1).

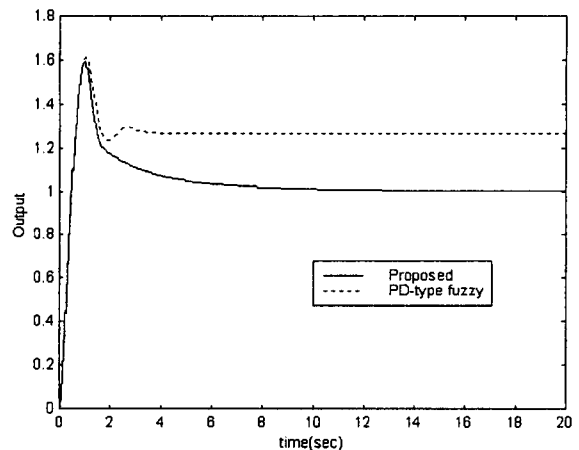


그림 6. 단위계단 응답(예 2).
Fig. 6. Unit step response(example 2).

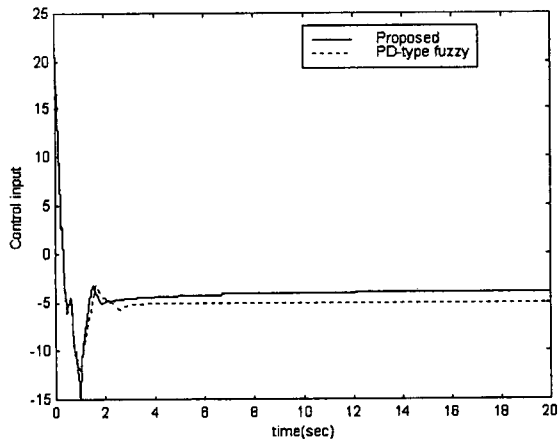


그림 7. 제어입력(예 2).
Fig. 7. Control input(example 2).

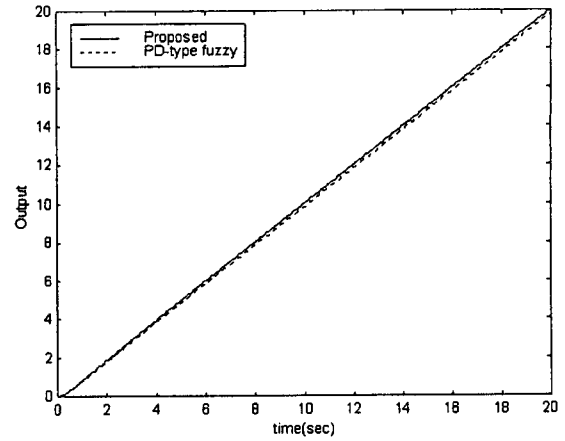


그림 10. 단위경사 응답(예 3).
Fig. 10. Unit ramp response(example 3).

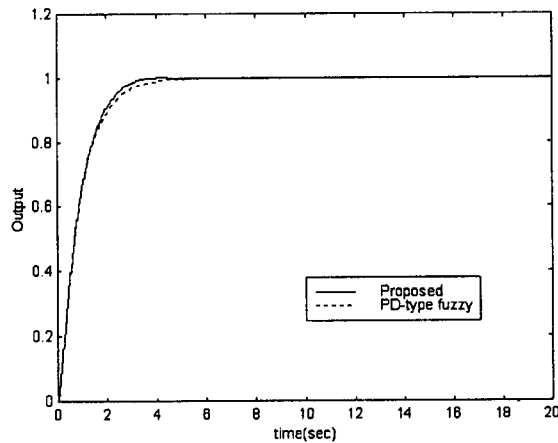


그림 8. 단위계단 응답(예 3).
Fig. 8. Unit step response(example 3).

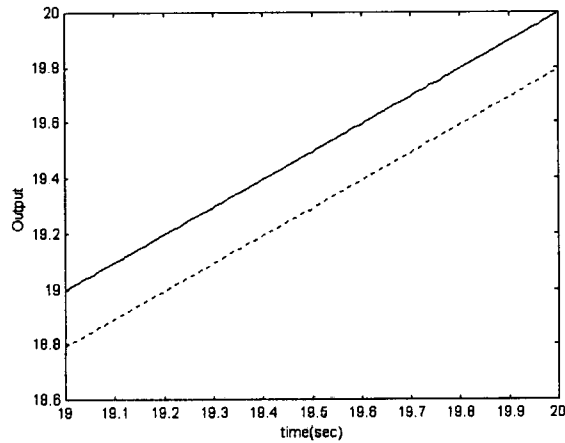


그림 11. 단위경사 응답: 확대(예 3).
Fig. 11. Unit ramp response: magnification(example 3).

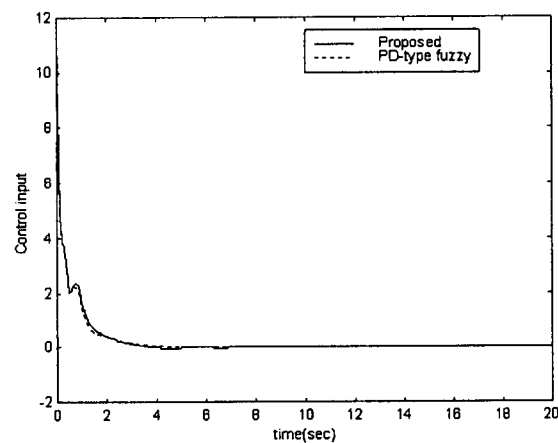


그림 9. 제어입력(예 3)
Fig. 9. Control input(example 3).

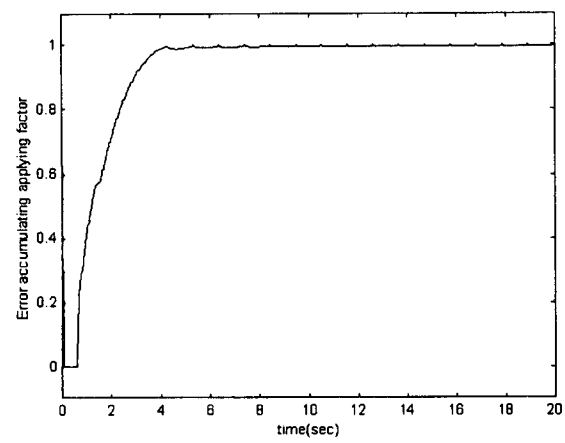


그림 12. 오차적분 적용계수(예 3).
Fig. 12. Error-accumulating applying factor(example 3).

1, 2와 달리 PD형 퍼지제어도 오차가 0으로 기준신호를 추적한다. 그러나 표 3에서 보듯이 제안한 제어가 과도 응답 특성을 개선하고 성능 지수인 IAE, ITAE도 감소됨을 알 수 있다. 또한 예 3의 시스템에 단위경사 입력을 적용한 결과인 그림 10, 11에서도 PD 제어가 0.21이라는 E_{ss} 를 가지

는데 반해 제안한 제어기는 오차 없이 기준 신호를 추적한다. 그림 11은 그림 10의 결과를 19초에서 20초 사이로 확대 표시하였다. 마지막으로 예 3에서 오차적분 적용계수의 결과를 그림 12에 나타내었으며 프로세스의 상태에 따른 퍼지 추론의 결과를 볼 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 오차적분 적용계수를 이용한 PD+I 퍼지 제어기를 제안하였다. 사용한 퍼지 제어기는 2입력 2출력 구조를 가지며 PD형 퍼지제어기를 기본 구조로 사용하여 과도상태 응답특성이 좋다. 또한 제어되는 프로세스의 현재 상태에 따라 실시간으로 조정되는 오차적분 적용계수의 이용으로 정상상태 오차를 제거하며 과도상태 응답특성도 개선한다. 특히 퍼지추론에서 오차적분 적용계수는 스케일링 계수가 필요 없고 퍼지입력을 PD형 퍼지제어기와 동일한 것을 사용하여 조정되는 제어기의 파라미터의 수를 최소화함으로써 시스템의 조정이 용이하다. 그리고 I형 제어기의 구조에 리셋팅 기능이 포함되어있기 때문에 적분기에서 일반적으로 발생할 수 있는 wind-up 현상도 개선할 수 있다. 제안한 제어기를 여러 플랜트에 적용, PD형 퍼지제어기와 비교하여 그 타당성을 보였으며 조정 능력에 자유도가 추가됨으로써 성능이 개선됨을 알 수 있고 각 시스템에 대해 동일하게 적용하였던 제어규칙과 소속함수를 제어목적에 맞게 조정하면 제어성능을 더욱 개선할 수 있을 것이다.

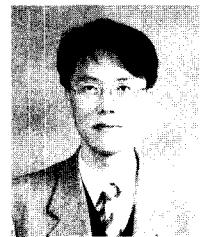
참고문헌

- [1] L. A. Zadeh, "Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision process," *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, vol. 3, no. 1, pp. 28-44, 1973.
- [2] E. H. Mamdani, "Applications of fuzzy algorithms for simple dynamic plant," *Proc. IEE*, vol. 121, no. 12, pp. 1585-1588, 1974.

- [3] T. Takagi and M. Sugeno, "Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control," *IEEE Trans. Syst. Man and Cybern.*, vol. 15, no. 1, 1985.
- [4] G. J. Klir and T. A. Folger, *Fuzzy Sets, Uncertainty, and Information*, Prentice-Hall, 1988.
- [5] L. X. Wang, *Adaptive Fuzzy Systems and Control*, Prentice-Hall, 1994.
- [6] 박헌수, 이지홍, 채석, "A fuzzy variable structure controller composed of position-type and velocity-type control rule," 한국퍼지시스템학회 논문지, 제3권, pp. 56-57, 1993.
- [7] R. K. Mudi and N. R. Pal, "A robust self-tuning scheme for PI- and PD-type fuzzy controllers," *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 7, no. 1, Feb., 1999.
- [8] H. A. Malki, H. Li, and G. Chen, "New design and stability analysis of fuzzy proportional-derivative control systems," *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 2, pp. 245-254, Nov., 1994.
- [9] 김병수, 박준열, "Weighted fuzzy controller composed of position type fuzzy controller and velocity type fuzzy controller," *KACC Proc.*, Oct., 1996.
- [10] 이지홍, "제어량의 크기를 조건부에 포함하는 PI형 퍼지제어기," 대한전자공학회 논문지, 제30권, B편, 제5호, pp. 109-119, 1993.
- [11] J. H. Lee, "On methods for improving performance of PI-type fuzzy logic controllers," *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 1, no. 4, Nov., 1993.
- [12] 변중남, 퍼지논리 제어, 홍릉과학, 1997.
- [13] R. Palm, "Sliding mode fuzzy control," *IEEE Proc. Fuzzy Syst.*, San Diego, CA, pp. 519-526, 1992.

전 경 한

제어·자동화·시스템공학 논문지, 제7권, 제7호, 604쪽 참조.



이 연 정

1961년 9월 10일생. 1984년 한양대 전자공학과 졸업(공학사). 1986년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학석사). 1994년 동대학원 전자공학과 졸업(공학박사). 현재 경북대학교 전기전자컴퓨터학부 조교수. 관심분야는 로보틱스, 산업자동화 및 지능제어.

최 봉 열

제어·자동화·시스템공학 논문지, 제7권, 제7호, 604쪽 참조.