

## 비선형 퍼지 PID 제어기의 성능 개선에 관한 연구

김인환† · 이병결\* · 김종화\*\*

(원고접수일 : 2003년 8월 19일, 심사완료일 : 2003년 9월 20일)

### A Study on the Performance Improvement of a Nonlinear Fuzzy PID Controller

In-Hwan Kim† · Byung-Kyul Lee\* · Jong-Hwa Kim\*\*

**Key words** : Nonlinear Control(비선형제어), Fuzzy Control(퍼지제어), Fuzzy PID Controller  
(퍼지 PID 제어기)

#### Abstract

In this paper, in order to improve the disadvantages of the fixed design-parameter fuzzy PID controller, a new fuzzy PID controller named a variable design-parameter fuzzy PID controller is suggested. The main characteristic of the suggested controller is to adjust design-parameters of the controller by comparing magnitudes between fuzzy controller inputs at each sampling time when controller inputs are measured. As a result, all fuzzy input partitioned spaces converge within a time-varying normalization scale, and the resultant PID control action can always be applied precisely regardless of operating input magnitudes.

In order to verify the effectiveness of the suggested controller, several a computer simulations for a nonlinear system are executed and the control parameters of the variable design-parameter fuzzy PID controller are throughly analyzed.

#### 1. 서 론

산업 현장에서 사용되고 있는 많은 제어기들은 대상 시스템의 수학적 모델에 근거하여 설계되어 왔으며, 설계시 시스템의 동특성에 대한 정확한 지식을 요구한다. 하지만 최근 시스템의 규모가 커지고 복잡해짐에 따라 파라미터 변동, 모델링 오차, 비

선형성, 외란 등 여러 가지 불확실성을 내포하게 됨으로써 시스템의 수학적 모델을 정확하게 구하기가 대단히 어려워진다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 알려져 있지 않은 시스템이 선형일 경우에는 적응제어<sup>(1)</sup>방법을 도입하였고 비선형 시스템의 경우에는 Tagaki-Sugeno 퍼지제어방법<sup>(2)</sup> 등을 도입하여 위의 문제점을 극복하고자 노력하여 왔다.

† 책임저자(진주산업대학교 기계공학과) E-mail: ihkim@cjcc.jinju.ac.kr, T : 055)751-3354

\* 한국해양대학교 대학원 제어계측공학과 (ybk1124@hanmail.net)

\*\* 한국해양대학교 기계·정보공학부 (kimjh@hhu.ac.kr)

하지만 이러한 제어방법들은 시불변 시스템인 경우에는 적용 가능하지만, 시변 시스템일 경우에는 시스템의 동특성이 시간에 따라 변함으로써 적용 상에 한계점을 가지고 있다<sup>[3]</sup>.

이러한 문제점을 해결하고자 비선형 시변 제어 파라미터를 가지는 비선형 퍼지 PID 제어 기법도 도입되었다<sup>[4]</sup>. 비선형 퍼지 PID 제어기법은 플랜트의 입출력 데이터를 기반으로 퍼지 입출력 집합을 정의하고, 오차를 포함한 퍼지 입력변수들의 대소 관계를 통한 퍼지 제어규칙에 의해 제어기의 출력을 결정하게 되며, 퍼지 제어규칙의 수가 적고 출력의 형태가 수학적으로 표현되어 구현하기 쉬우며 제어 파라미터가 시변인 특징을 갖고 있다. 따라서 이 제어기법은 비선형성과 불확실성을 갖는 시스템을 제어하는 경우에 탁월한 성능을 발휘하는 것으로 판명되었다<sup>[4]</sup>. 그러나 이러한 퍼지 PID 제어기법은 제어기의 설계파라미터가 한 번 결정되면 고정됨으로써 초기 설계시 적용되었던 기준값보다 넓은 동작 범위의 입력이 인가될 경우에는 설계시 고려된 퍼지 PID 제어동작의 적용범위를 벗어나게 되어 제대로 효능을 발휘하지 못하게 되고, 이와는 반대로 설계시의 기준값보다 작은 범위의 입력이 인가될 경우에도 그 순간 요구되는

PID 제어동작에 따른 제어입력이 정확하게 생성되지 않아 정교한 제어가 이루어지지 않는 단점을 갖고 있다.

따라서 본 논문에서는 제어기 입력 변수의 변화를 실시간으로 측정, 입력 변수들의 상호관계를 비교하여 매 샘플링 시간마다 제어기의 주요 설계파라미터를 가변시킴으로써 동작입력의 범위에 무관한 제어동작 범위를 가지면서도, 보다 빠르고 정밀한 제어가 가능하도록 제어기 설계파라미터가 가변되는 비선형 퍼지 PID 제어기법을 제안하고자 한다. 또한 제안되는 가변 설계파라미터 비선형 퍼지 PID 제어기법의 효용성을 검증하기 위하여 비선형 시스템을 대상으로 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하고 기존의 제어기와 성능을 비교 분석함으로써 그 유효성을 검증하고자 한다.

## 2. 가변 설계파라미터 비선형 퍼지 PID 제어기 설계

### 2.1 제어기의 기본구조

그림 1은 본 논문에서 제안하는 가변 설계파라미터 비선형 퍼지 PID 제어기의 기본구성을 나타

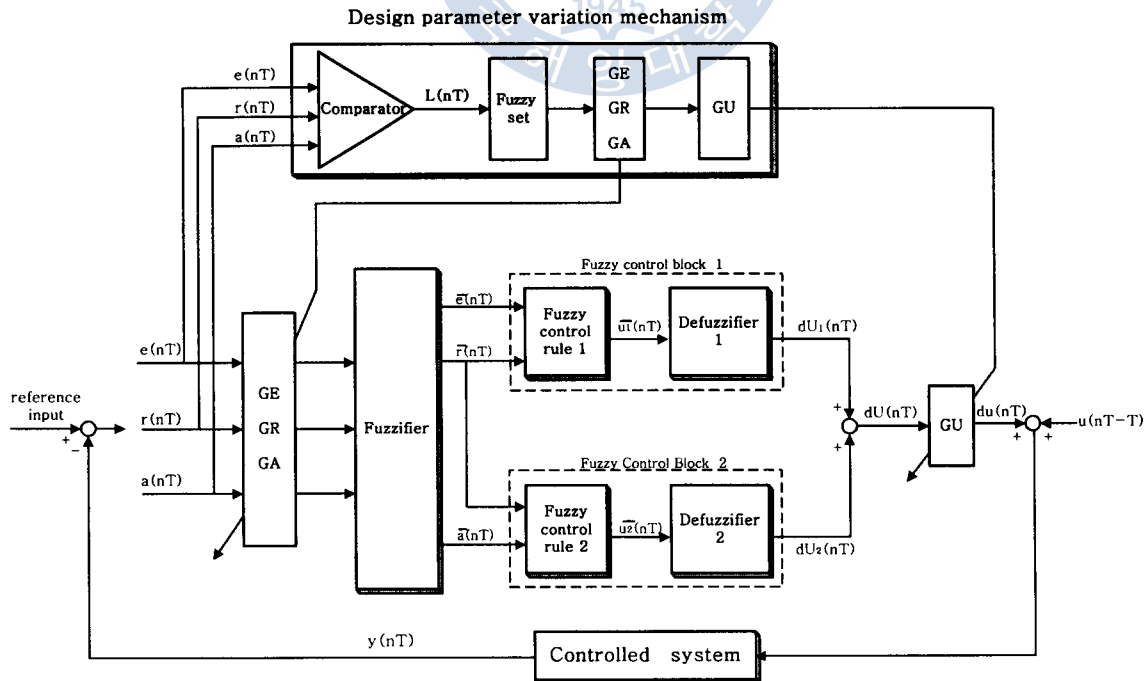


Fig. 1 Structure of a variable design-parameter fuzzy PID control system.

낸다. FLC(Fuzzy Logic Controller)를 구성하기 위해서 목표값에 대한 오차와 오차의 변화율 그리고 오차의 변화율에 대한 변화율을 입력으로 사용하고 있다. 그리고 이러한 세 입력과 함께 퍼지 제어규칙과 비퍼지화기를 각각 포함하고 있는 서로 독립적인 두 개의 퍼지 제어블록으로 구성되어 있다. 따라서 FLC의 출력은 두 퍼지 제어블록의 출력 값을 더함으로써 구할 수 있다.

$$e(nT) = \text{reference input} - y(nT) \quad (1)$$

$$\bar{e}(nT) = F(e^*), \quad e^* = GE \times e(nT) \quad (2)$$

$$r(nT) = [e(nT) - e(nT - T)]/T \quad (3)$$

$$\bar{r}(nT) = F(r^*), \quad r^* = GR \times r(nT) \quad (4)$$

$$a(nT) = [r(nT) - r(nT - T)]/T \quad (5)$$

$$= [e(nT) - 2e(nT - T) + e(nT - 2T)]/T^2 \quad (6)$$

$$\bar{a}(nT) = F(a^*), \quad a^* = GA \times a(nT) \quad (7)$$

$$u(nT) = du(nT) + u(nT - T), \quad du(nT) = GU \times dU(nT) \quad (8)$$

$$dU(nT) = dU_1(nT) + dU_2(nT) \quad (9)$$

여기서 n은 양의 정수를 나타내며 T는 샘플링 시간을,  $u(nT), y(nT), e(nT), r(nT), a(nT)$ 는 각각 샘플링 시간 nT에서 프로세스의 입력, 출력, 오차 (error로 표기), 오차의 변화율(rate로 표기),  $r(nT)$ 의 변화율(acc로 표기)을 나타내며 GE, GR, GA, GU 는 각각 error, rate, acc, 퍼지 제어블록 1, 2의 출력을 정규화하기 위한 스케일 파라미터를 의미하며 퍼지제어기의 설계파라미터

이다.  $F(\cdot)$ 는 정규화된 입력신호 ( $\cdot$ )의 퍼지화를 의미한다.  $dU_1, dU_2$  는 퍼지 제어블록 1, 2에서의 출력을 표시하고 du는 제어기의 증분출력, u는 프로세스에 인가되는 제어입력을 의미한다.

### 2.2 퍼지화 알고리즘

그림 2는 정규화된 입력변수들의 퍼지화 알고리즘을 보이고 있다.

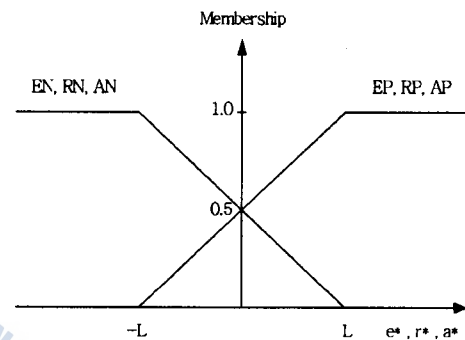


Fig. 2 Input fuzzification for  $e^*, r^*$  and  $a^*$ .

퍼지집합 'error'는 그림 2에서 나타낸 것과 같이 EP(error\_positive)와 EN(error\_negative)의 두 개의 멤버를 갖고 있으며, 또한 퍼지집합 'rate'는 RP(rate\_positive)와 RN(rate\_negative)의 두 개의 멤버, 퍼지집합 'acc'는 AP(acc\_positive)와 AN(acc\_negative)의 두 개의 멤버를 갖는다. 퍼지집합 'output1'은 그림 3(a)에서 보인 것과 같이 OP(output\_positive), OZ(output\_zero)와 ON(output\_negative)의 세 개의 멤버를 갖

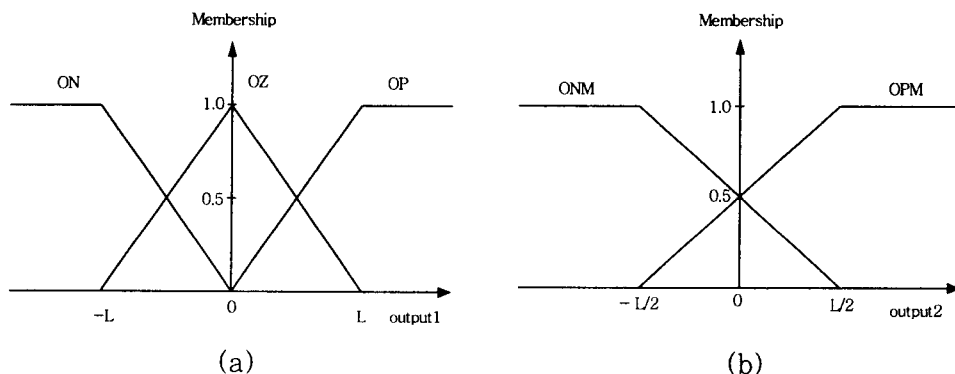


Fig. 3 Output fuzzification for fuzzy control block 1(a) / fuzzy control block 2 (b).

고 있고, 'output2'는 그림 3(b)에서 보인 것과 같이 OPM(output\_positive\_middle)과 ONM(output\_negative\_middle)의 두 개의 멤버를 갖는다.

2.3 퍼지 제어규칙

퍼지 제어규칙은 숙련자의 풍부한 경험적 지식과 제어 엔지니어의 전문가적 지식을 기초로 하여 만들어진다. 이 퍼지 제어규칙은 (If - then -) 형식으로 표현되며, 본 논문에서 사용되는 퍼지 제어규칙을 기술하면 다음과 같다. 그림 1의 퍼지 제어블록1과 퍼지 제어블록2에 대한 퍼지제어규칙은 표1과 같다.

가변 설계파라미터 퍼지 PID 제어기법은 기준 입력값과 시스템의 출력값 사이에서 발생하는 error, rate, acc를 매 샘플링 시간마다 측정하여 이 중 가장 큰 값을 기준으로 제어기의 입력을 정규화시키기 위한 정규화 구간 L의 값을 가변시켜

정규화변수  $e^*$ ,  $r^*$ ,  $a^*$ 가 항상 구간  $[-L, L]$ 의 범위에 속하게 하는 방법이다. 이때 모든 정규화변수는 항상 정규화 구간 내에 존재하게 된다.

퍼지 입출력 집합을 결정하는 L은 다음과 같은 규칙에 의해 결정된다.

$$\text{IF } e(nT) = \max[e(nT), r(nT), a(nT)] \text{ then } L(nT) = GE \times e(nT)$$

$$\text{IF } r(nT) = \max[e(nT), r(nT), a(nT)] \text{ then } L(nT) = GR \times r(nT)$$

$$\text{IF } a(nT) = \max[e(nT), r(nT), a(nT)] \text{ then } L(nT) = GA \times a(nT)$$

따라서 가변되는 L(nT)로 인해 제어블록1, 2에 대한 입력공간은 그림 4(a), (b)와 같이  $[-L, L]$  구간내의 (IC1)<sub>1</sub> ~ (IC8)<sub>1</sub>, (IC1)<sub>2</sub> ~ (IC8)<sub>2</sub>만으로 분할된다.

이것은 분할된 변수들의 입력 공간 수를 대폭 줄이는 효과를 가져올 뿐만 아니라, 제어기의 초기 설계 당시에 사용되는 기준입력보다 큰 동작 범위를 가진 입력이 인가되더라도 항상 정규화 범위 내에서 제어동작이 이루어짐을 의미한다. 따라서 제어기의 형태가 PID인 본 논문의 경우에는 플랜

Table 1 Fuzzy control rules for fuzzy control block 1 / fuzzy control block 2.

fuzzy control block 1	fuzzy control block 2
(R1) <sub>1</sub> : If error = EP & rate = RP then output = OP	(R1) <sub>2</sub> : If rate = RP & acc = AP then output = OPM
(R2) <sub>1</sub> : If error = EP & rate = RN then output = OZ	(R2) <sub>2</sub> : If rate = RP & acc = AN then output = ONM
(R3) <sub>1</sub> : If error = EN & rate = RP then output = OZ	(R3) <sub>2</sub> : If rate = RN & acc = AP then output = OPM
(R4) <sub>1</sub> : If error = EN & rate = RN then output = ON	(R4) <sub>2</sub> : If rate = RN & acc = AN then output = ONM

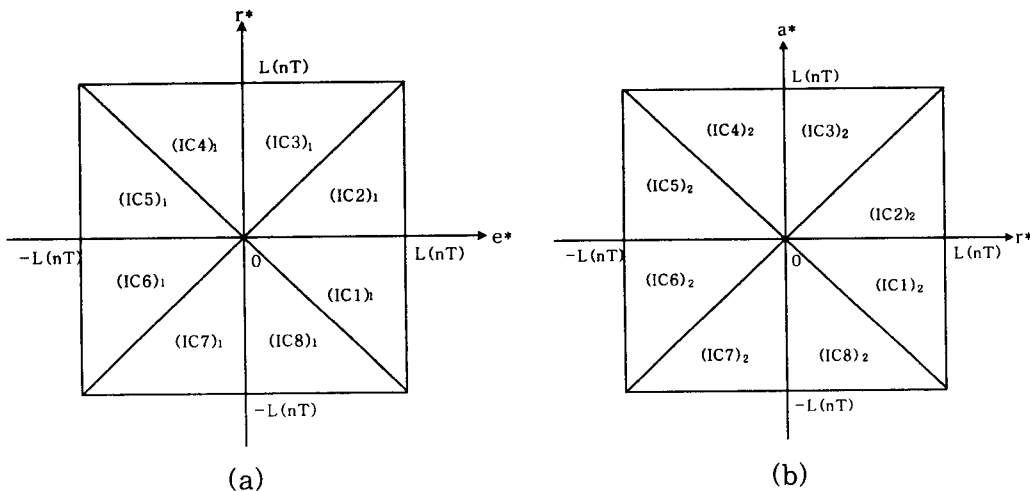


Fig. 4 Possible input combination of  $e^*$  and  $r^*$ (a) /  $r^*$  and  $a^*$ (b).

트 동작입력의 범위에 관계없이 항상 PID 제어동작을 수행할 수 있음을 의미한다.

### 2.4 비퍼지화 알고리즘

비퍼지화 방법으로는 중심평균법(Center Average Method)를 사용하였다. 따라서 비퍼지화된 출력은 (10)과 같이 정의된다.

$$dU = \frac{\sum_{i=0}^n \mu_{output}(w_i) \times w_i}{\sum_{i=0}^n \mu_{output}(w_i)} \quad (10)$$

여기서  $n$ 은 퍼지제어 규칙의 수,  $w_i$ 는 멤버의 최대값. 그리고  $\mu_{output}(w_i)$ 는 멤버의 소속정도를 나타낸다.

FLC의 증분출력  $dU(nT)$ 는 퍼지 제어블록1의 증분출력  $dU_1(nT)$ 와 퍼지 제어블록2의 증분출력  $dU_2(nT)$ 를 산술적으로 합하여 구할 수 있고, 여기에 출력 스케일 파라미터  $GU$ 를 곱함으로써 플랜트에 인가될 제어입력 신호의 증분  $du(nT)$ 를 생성할 수 있다.

결과적으로 FLC의 증분출력  $dU(nT)$ 는

$$dU(nT) = dU_1(nT) + dU_2(nT) \quad (11)$$

이고, 증분출력  $dU(nT)$ 에 대한 제어기의 최종 출력이자 프로세스 제어입력의 증분  $du(nT)$ 는

$$du(nT) = GU \times dU(nT) \quad (12)$$

이다.

가변 설계파라미터 퍼지 PID 제어기에 대한 설계파라미터 가변 메카니즘은 error, rate, acc의 세 입력을 비교하여 가장 큰 값을 기준으로  $L(nT)$ 의 값을 정한 후, 설계파라미터인 스케일 파라미터  $GE(nT)$ ,  $GR(nT)$ ,  $GA(nT)$ ,  $GU(nT)$ 를 재조정한다. 이 때 중심 평균법을 사용하여 퍼지 제어블록 1, 2에 대한 비퍼지화 출력을 더하면 다음과 같이 입력들의 조합에 따라 다음 네 가지 형태의 퍼지 PID 제어기 출력을 얻을 수 있다.

- 1) If  $GR(nT) \times |r(nT)| \leq GE(nT) \times |e(nT)| \leq L(nT)$   
&  $GA(nT) \times |a(nT)| \leq GR(nT) \times |r(nT)| \leq L(nT)$

$$\begin{aligned} du(nT) &= \frac{0.5 \times L(nT) \times GU \times GE}{2L(nT) - GE \times |e(nT)|} e(nT) \\ &+ \frac{0.5 \times L(nT) \times GU \times GR}{2L(nT) - GE \times |e(nT)|} r(nT) \\ &+ \frac{0.25 \times L(nT) \times GU \times GA}{2L(nT) - GR \times |r(nT)|} a(nT) \quad (13) \end{aligned}$$

- 2) If  $GR \times |r(nT)| \leq GE \times |e(nT)| \leq L(nT)$   
&  $GR(nT) \times |r(nT)| \leq GA(nT) \times |a(nT)| \leq L(nT)$

$$\begin{aligned} du(nT) &= \frac{0.5 \times L(nT) \times GU \times GE}{2L(nT) - GE \times |e(nT)|} e(nT) \\ &+ \frac{0.5 \times L(nT) \times GU \times GR}{2L(nT) - GE \times |e(nT)|} r(nT) \\ &+ \frac{0.25 \times L(nT) \times GU \times GA}{2L(nT) - GA \times |a(nT)|} a(nT) \quad (14) \end{aligned}$$

- 3) If  $GE \times |e(nT)| \leq GR \times |r(nT)| \leq L(nT)$   
&  $GA(nT) \times |a(nT)| \leq GR(nT) \times |r(nT)| \leq L(nT)$ ,

$$\begin{aligned} du(nT) &= \frac{0.5 \times L(nT) \times GU \times GE}{2L(nT) - GR \times |r(nT)|} e(nT) \\ &+ \frac{0.5 \times L(nT) \times GU \times GR}{2L(nT) - GR \times |r(nT)|} r(nT) \\ &+ \frac{0.25 \times L(nT) \times GU \times GA}{2L(nT) - GR \times |r(nT)|} a(nT) \quad (15) \end{aligned}$$

- 4) If  $GE \times |e(nT)| \leq GR \times |r(nT)| \leq L(nT)$   
&  $GR(nT) \times |r(nT)| \leq GA(nT) \times |a(nT)| \leq L(nT)$ ,

$$\begin{aligned} du(nT) &= \frac{0.5 \times L(nT) \times GU \times GE}{2L(nT) - GR \times |r(nT)|} e(nT) \\ &+ \frac{0.5 \times L(nT) \times GU \times GR}{2L(nT) - GR \times |r(nT)|} r(nT) \\ &+ \frac{0.25 \times L(nT) \times GU \times GA}{2L(nT) - GA \times |a(nT)|} a(nT) \quad (16) \end{aligned}$$

한편, 매 샘플링 시간에 있어서  $L(nT)$ 를 결정하고, 이를 이용하여 나머지 설계파라미터인 스케일 파라미터  $GE(nT)$ ,  $GR(nT)$ ,  $GA(nT)$ ,  $GU(nT)$ 를 재조정한다면, 위의 네 가지 조건들에 있어 항상 등호만 성립하게 되고 결과적으로 모두 같게 되어 하나의 조건 즉, 조건이 없는 것과 같다. 또한 결론부의 수식에 있어서 PID 게인들의 분모는 매 샘플링 시간마다 항상  $L(nT)$ 가 됨을 알 수 있다.

따라서, 조건이 필요 없고 결론부는 다음과 같이 하나의 형태로 간단히 표시됨을 알 수 있다.

$$du(nT) = K_i(nT) \times e(nT) + K_p(nT) \times r(nT) + K_d(nT) \times a(nT) \quad (17)$$

여기서,

$$K_i(nT) = 0.5 \times GU(nT) \times GE(nT)$$

$$K_p(nT) = 0.5 \times GU(nT) \times GR(nT)$$

$$K_d(nT) = 0.5 \times GU(nT) \times GA(nT) \text{이다.}$$

### 2.5 가변 설계파라미터 퍼지 PID 제어기의 설계절차

가변 설계파라미터 퍼지 PID 제어기는, 비록 FLC의 설계과정을 따르지만, 매 샘플링 시간마다 설계파라미터들을 가변시킴으로써 전전부의 조건이 필요 없고 하나의 결론부만 가지는 아주 단순한 형태가 되고, 시스템의 동작상황이 어떻게 변하든 간에 항상 최적의 PID 제어입력을 생성하게 함을 알 수 있다. 또한 매 샘플링 시간마다 입력들의 대소를 판단하는 알고리즘이 추가되는 반면, 퍼지화 입력의 조합에 대응하여 출력을 결정하는 조건이 없어지기 때문에 오히려 연산량이 줄어들게 되어 실제 구현의 측면에서도 유리함을 알 수 있다. 그림 5는 이와 같은 가변 설계파라미터 퍼지 PID

제어기의 설계 절차를 보여 주고 있다.

### 3. 컴퓨터 시뮬레이션 및 결과 고찰

본 논문에서 제안한 가변 설계파라미터 퍼지 PID 제어기의 성능을 검증하기 위하여 비선형 시스템에 적용하여 각각 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 먼저 단위 계단 입력에 대한 각 시스템들의 응답을 살펴본 후 제어기 설계 절차를 거쳐서 비례계인  $K_p^*$ , 적분계인  $K_i^*$ , 그리고 미분계인  $K_d^*$ 의 값들을 결정한다. 결정된 계인들을 고정 설계파라미터 퍼지 PID 제어기, 가변 설계파라미터 퍼지 PID 제어기에 대입하여 제어시스템의 응답을 비교함으로써 제어기의 성능을 분석한다. 또한, 동작 범위 변화에 따른 제어기의 성능을 평가하기 위해 2개의 다른 동작 범위에 대한 시뮬레이션을 실시하였다.

#### 3.1 시뮬레이션 1

(18)과 같은 미분 방정식으로 표현되는 비선형 시스템에 대해서 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 각 제어기들의 응답 특성을 비교해 본다.

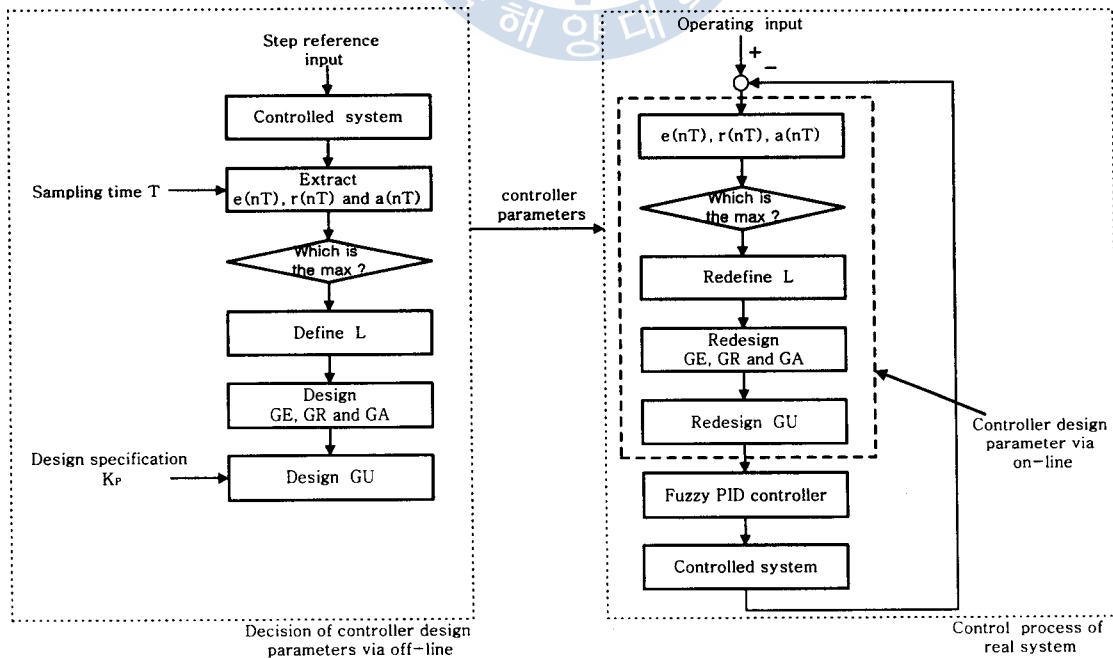


Fig. 5 Design procedure of the variable design-parameter fuzzy PID controller.

$$\ddot{y} + \dot{y} = 0.5y^2 + 2u \quad (18)$$

그림 6에서 보는 바와 같이 단순 피드백을 통한 단위 계단 입력에 대한 시스템의 출력은 목표값에 수렴하지 못하고 계속 발산하는 불안정한 시스템을 알 수 있다.

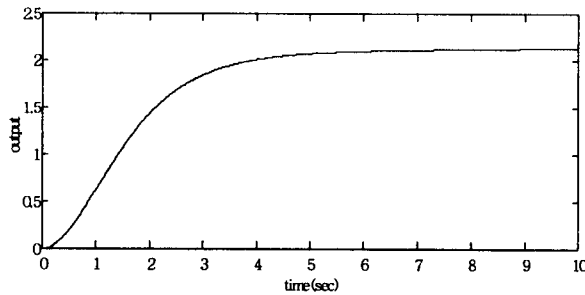


Fig. 6 Unit step response of the unit feedback system.

그림 6과 같은 불안정한 비선형 시스템에 대해 단위 스텝을 주었을 때 출력되는 제어기들의 응답곡선을 그림 7에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 가변구조 비선형 퍼지 PID 제어기를 통한 응답곡선은 빠른 상승시간을 가지면서도 오

버슈트가 거의 발생하지 않고 목표값에 빨리 정착함으로써, 불안정 비선형 시스템임에도 불구하고 만족할만한 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다.

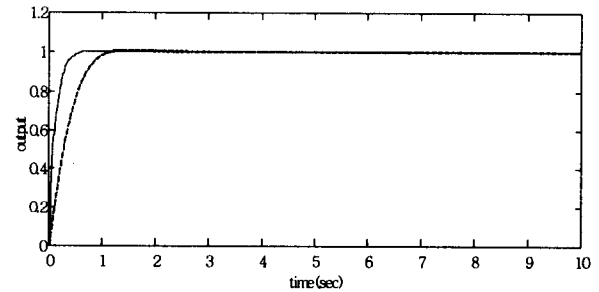


Fig. 7 Responses of control systems when reference is equal to 1.

비선형 시스템에 대해서 가변 설계파라미터 퍼지 PID 제어기가 고정 설계파라미터 퍼지 PID 제어기보다 모든 목표 값에 대하여 좋은 응답 성능을 가짐을 알 수 있는데, 이는 설계파라미터  $K_i$ ,  $K_p$ ,  $K_d$  가 온라인으로 가변되어 임의의 시간에서 시스템의 특성에 가장 적합한 값으로 조정됨으로써 최적의 PID 제어동작을 취하게 되어 상승

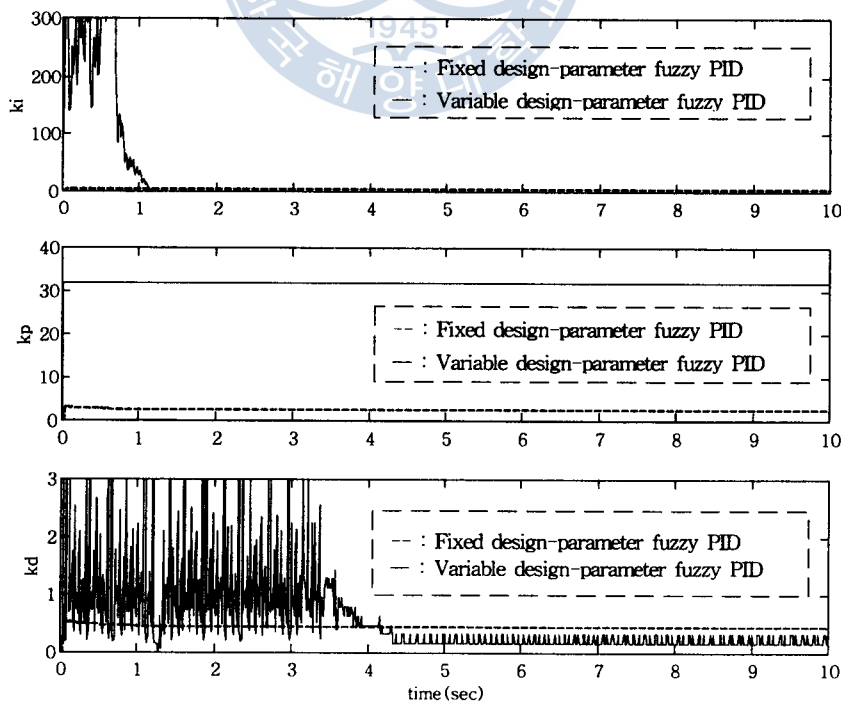


Fig. 8 Changes of controller parameters when reference input is equal to 1.

시간과 정착시간이 짧게 된다.

가변설계 파라미터 퍼지 PID 제어기와 고정설계 파라미터 퍼지 PID 제어기의 설계파라미터  $K_i$ ,  $K_p$ ,  $K_d$ 의 변화는 그림 8과 같다.

가변 설계파라미터 퍼지 PID 제어기의 파라미터  $K_p$ 는 일정하고,  $K_i$ 는 0으로 수렴하며 파라미터  $K_d$ 는 지속적으로 변화하여 시스템을 안정화시키는 작용을 함을 알 수 있다.  $K_d$ 가 정상상태에서도 지속적으로 변하여 마치 매우 불안정한 제어기처럼 인식될 수 있지만, 그 변화폭이 매우 작고 또한 CPU내에서 디지털적으로 변하기 때문에 전혀 문제가 되지 않는다. 또한 고정 설계파라미터 퍼지 PID 제어기의 경우 정상상태에서도  $K_i$  값이 0으로 수렴하지 않고 일정한 값에 수렴하여 아날로그 선형 PID 제어기의 적분동작처럼 동작함으로써 정상상태에서 리미트 사이클현상을 유발할 가능성이 있지만, 가변 설계파라미터 퍼지 PID제

어기의  $K_i(nT)$ 는 0으로 수렴되는 좋은 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.

가변 설계파라미터 퍼지 PID 제어기에서 비례이득  $K_p$ 가 가변되지 않고 일정한 이유는 다음과 같다. 즉 제어기의 전체이득은 입력 스케일 파라미터 GR과 출력 스케일 파라미터 GU에 의해서 결정되고 이 둘의 곱은 항상 일정해야만 제어기 전체의 이득도 일정하게 된다. 비례이득  $K_p$ 는 제어기 설계사양 중에서 상승시간 요구조건을 만족되도록 초기에 상수로 결정되며, 이후 설계파라미터 GR(nT)와 GU(nT)가 가변되더라도 그 곱이 항상 일정함으로써  $K_p(nT)$ 도 항상 일정하게 된다.

### 3.2 시뮬레이션 2

동작 범위의 변화에 따른 제어기의 성능을 평가하기 위해 기준입력이 0.5와 5인 경우에 대해 실

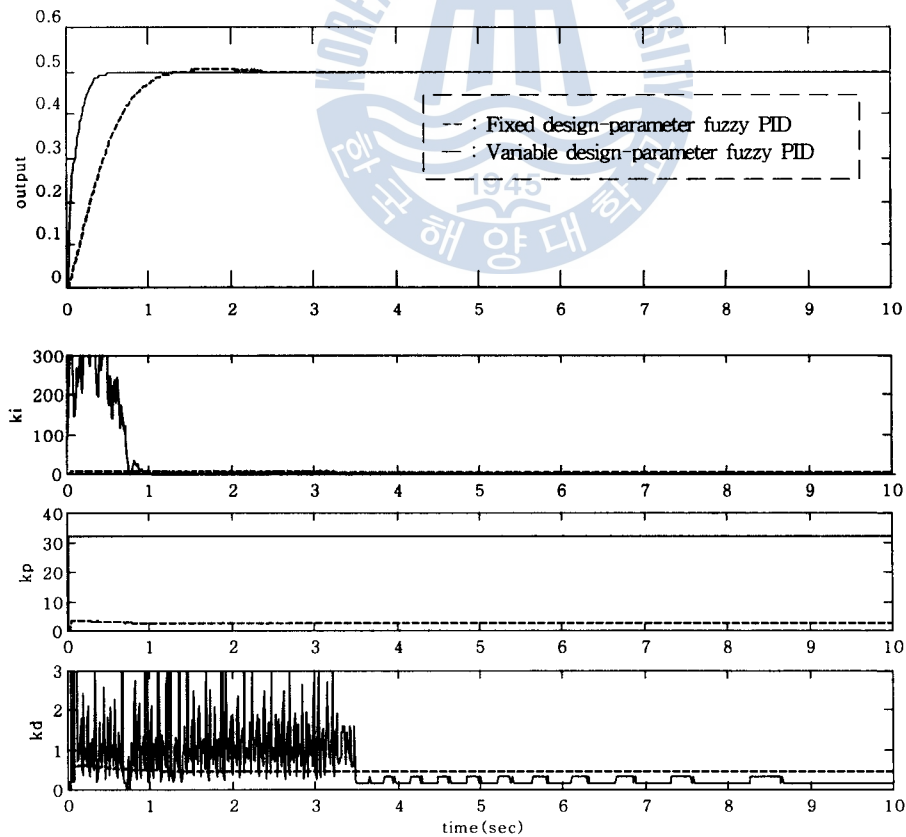


Fig. 9 Responses of control systems and changes of controller parameters when reference input is equal to 0.5.



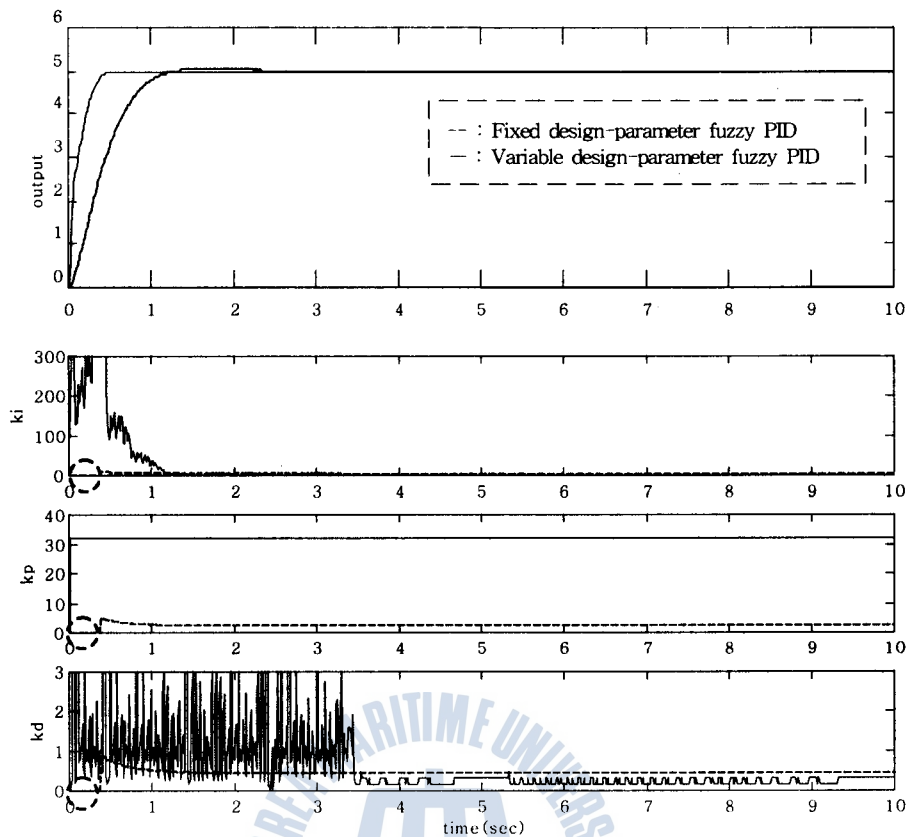


Fig. 10 Response of control systems and changes of controller parameters when reference input is equal to 5.

시한 시뮬레이션 결과는 그림 9, 10과 같다.

기준입력이 0.5로 작아진 경우(그림9), 고정 설계파라미터 퍼지PID 제어기와 가변 설계파라미터 퍼지PID 제어기 모두 파라미터  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ 가 초기 시간부터 동작을 하고 있음을 확인할 수 있다. 고정 설계 파라미터 퍼지PID 제어기의 경우 기준 입력이 1인 경우에 대하여 설계된 파라미터의 전체 이득이 커서 오버슈트가 발생하지만, 가변 설계파라미터 퍼지PID 제어기의 경우 퍼지분할 변수  $L$ 의 변화로 인한 설계파라미터의 변화로 오버슈트가 발생하지 않고 있음을 볼 수 있다.

기준입력이 5로 커진 경우(그림10), 고정 설계파라미터 퍼지 PID 제어기에서는 설계조건 보다 큰 값이 입력으로 작용했을 때에는 설계파라미터  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ 에 의한 PID 제어기에 대해서는 초기시간 이후 다소 지연되어 그 동작특성이 나타남을 알 수 있다(○부분). 이는 파라미터에 대한

초기 입력이 고정 설계파라미터 퍼지PID 제어기의 동작범위 밖에 존재하여 설계파라미터  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ 의 동작이 제대로 이루어지지 않기 때문이다. 가변 설계파라미터 퍼지PID 제어기는 기준 입력의 변화에 따라 퍼지분할 변수  $L$ 을 변화하여 제어동작이 퍼지 PID 제어기 동작범위 내에서 이루어지도록 하고 있다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 제어기의 파라미터가 시간에 따라 변함으로써 비선형 시스템의 제어에 특히 유용한 것으로 판명된 기존의 고정 설계파라미터 퍼지 PID 제어기의 단점을 보완하여 시스템의 동작범위에 관계없이 항상 정확한 제어동작이 이루어 질 수 있는 가변 설계파라미터 퍼지 PID 제어기를 제안하였다.

제안된 제어기는 입력 변수의 변화를 실시간으로 측정하고 입력 변수들의 상호관계를 비교하여 매 샘플링 시간마다 제어기의 주요 설계파라미터를 가변시켜 제어 입력 공간의 변화에 따라 능동적으로 제어 파라미터를 변화시키는 구조를 갖는다. 전개과정은 퍼지논리제어기의 설계과정을 따르지만 조건이 필요 없고 제어기의 출력형태가 비선형 시변 제어파라미터를 가진 하나의 PID 제어기 형태를 가짐으로 기존의 퍼지 PID 제어기법에 비해 간단한 형태를 갖는다. 또한 제안된 제어기법은 비선형 시스템을 대상으로 컴퓨터 시뮬레이션을 수행한 결과 초기 제어기의 설계 당시보다 넓은 동작범위의 변화에도 우수한 제어성능을 갖는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구는 한국해양대학교 BK21 사업단 지원으로 이루어진 것입니다.

### 참고문헌

[1] Kumpati S. Narendra and Anuradha M. Annaswamy, *Stable Adaptive Systems*, Prentice Hall International Inc., 1989.

[2] T. Tagaki and M. Sugeno, "Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control," *IEEE. Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. SMC-15, pp. 116-131, 1985.

[3] Hao Ying, William Siler and James J. Buckley, "Fuzzy Control Theory : A Nonlinear Case," *Automatica*, Vol. 26, No. 3, pp. 513-520, 1990.

[4] JongHwa Kim, "A Suggestion of Nonlinear Fuzzy PID Controller to Improve Transient Responses of Nonlinear or Uncertain Systems," *한국퍼지 및 지능 시스템학회 논문지*, Vol. 5, No. 4, pp. 87-100, 1995.

[6] Li-Xin Wang, *Adaptive Fuzzy Systems*

*and Contol : Design and Stability Analysis*, Prentice Hall International, Inc., 1994.

[7] Chuen Chien Lee, "Fuzzy Logic in Control Systems," *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 20, No. 2, March/April, 1990.

[8] James Carvajal, Guanrong Chen, and Haluk Ogmen, "Fuzzy PID controller," *Information Sciences* 123, pp. 249-270, 2000.

[9] Hao Ying, "A Nonlinear Fuzzy Controller with Linear Control Rules is The Sum of a Global Two-dimensional Multilevel Relay and a Local Nonlinear Proportional-integral Contoller," *Automatica*, Vol. 29, No. 2, pp. 499-505, 1993.

### 저 자 소 개



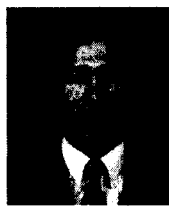
#### 김인환 (金仁煥)

1982년 부산대학교 기계공학과 졸업, 1989년 동대학원 석사(제어공학), 1999년 한국해양대학교 제어계측공학과 박사과정 수료, 1982-1988 국방과학연구소 연구원, 1992년 현재 진주산업대학교 기계공학과 부교수.



#### 이병걸 (李丙結)

1993년 한국해양대학교 제어계측공학과 졸업, 1998년 동대학원 석사(제어계측공학), 2000년 한국해양대학교 제어계측공학과 박사과정 수료.



#### 김종화 (金種和)

1981년 부산대학교 기계공학과 졸업, 1985년 동대학원 석사(제어공학), 1989년 동대학원 박사(제어공학), 1990년 현재 한국해양대학교 기계·정보공학부 정교수, 1996-1997 University of Wales, Cardiff 연구 교수.