

가변 파라미터를 갖는 비선형 퍼지 PID제어기에 관한 연구

A Study on the Nonlinear Fuzzy PID Controller with Variable Parameters

이병결* · 김인환** · 김종화***

Byungkyul Lee*, Inhwan Kim** and Jonghwa Kim***

* 한국해양대학교 대학원 제어계측공학과

** 진주산업대학교 기계공학과

*** 한국해양대학교 IT공학부

요 약

본 논문은 고정 파라미터를 갖는 퍼지 PID제어기의 퍼지화 과정에서 입력공간의 제한으로 제어입력이 제한되어 발생하는 제어시스템의 상승시간 지연과 불안정성을 개선하기 위해 가변 파라미터를 갖는 퍼지 PID제어기를 제안하고 설계방법과 추종성능을 기술한다. 제어기의 파라미터는 소이득정리로부터 제어시스템의 BIBO 안정도 조건을 만족하도록 가변되어 전체 제어시스템에 대한 BIBO 안정도를 만족시킨다.

Abstract

This paper proposes a nonlinear fuzzy PID controller with variable parameters to improve slow rising time and divergence occurred by limited input spaces and a resultant limited control input during fuzzification in a fuzzy PID controller with fixed parameters, and describes the design principle and tracking performance of a proposed fuzzy PID controller. The parameters of a proposed controller are adjusted by the stability conditions derived from 'small gain theorem' and satisfy the BIBO stability of overall control system.

Key words : 퍼지 제어기, 퍼지 PID 제어기, 비선형 제어, 안정도 분석, 소이득 정리

1. 서 론

퍼지제어기는 제어입력 직접결정형과 게인 스케줄링형, 두 방법을 통합한 형태로 분류할 수 있다. 퍼지 PID제어기의 주요 응용분야는 제어입력을 직접 결정하는 형태에 속한다. 자기동조[1]나 성능기반 감속동조[2]에 의해 유도된 퍼지추론을 통해 제어입력 직접결정형은 P, I, D 제어입력을 직접 결정하고, 게인 스케줄링형은 P, I, D 게인을 결정한다. 퍼지 PID제어기는 퍼지화기, 제어규칙 베이스, 비퍼지화기로 구성되고 퍼지제어기의 설계과정에 따라 유도된다. 유도된 퍼지 PID제어기는 선형 PID제어기의 이산시간 퍼지형 제어기가 되어 선형 PID제어기와 동일한 제어기 구조를 갖지만 게인은 입력신호에 대한 비선형 함수형태가 되고 가변된다. 그러므로 퍼지 PID제어기는 단순한 선형구조를 갖는 선형 PID제어기에 비해 향상된 비선형 보상능력과 자기동조 능력을 갖는다. 이런 퍼지 PID제어기는 게인 스케줄링 기능을 갖지만 파라미터들이 고정되므로 고정 파라미터를 갖는 퍼지 PID제어기[3,4]로 불린다.

퍼지 PID제어기의 파라미터가 고정됨에 따라 설계조건을

초과하는 입력에 대해 퍼지화기에 의해 제어입력이 제한되어 제어시스템의 과도응답이 나빠지거나 불안정하게 되고, 설계 조건 보다 작은 입력에 대해서 게인 스케줄링 기능이 약화되어 선형 PID제어기와 동일한 성능을 갖게 된다[4]. 따라서 본 논문은 입력의 변화에 영향을 받지 않고 P, I, D 제어 동작을 수행하도록 파라미터를 가변하는 비선형 퍼지 PID제어기를 제안하고 시뮬레이션을 통해 제어기의 성능을 검증한다.

2. 가변 파라미터를 갖는 퍼지 PID제어기의 제안

본 절은 고정 파라미터를 갖는 퍼지 PID제어기의 설계절차를 기술하고 파라미터 고정으로 발생하는 문제를 분석한 후에 가변 파라미터를 갖는 퍼지 PID제어기를 제안한다. 제안하는 가변 파라미터를 갖는 퍼지 PID제어기는 그림 1과 같이 고정 파라미터를 갖는 퍼지 PID제어기와 파라미터 가변 알고리즘으로 구성된다.

2.1 고정 파라미터를 갖는 퍼지 PID제어기

2.1.1 기본구조

고정 파라미터를 갖는 퍼지 PID제어기는 목표값에 대한 오차, 오차의 변화율, 오차의 변화율에 대한 변화율을 입력으로

접수일자 : 2004년 9월 1일

완료일자 : 2005년 1월 31일

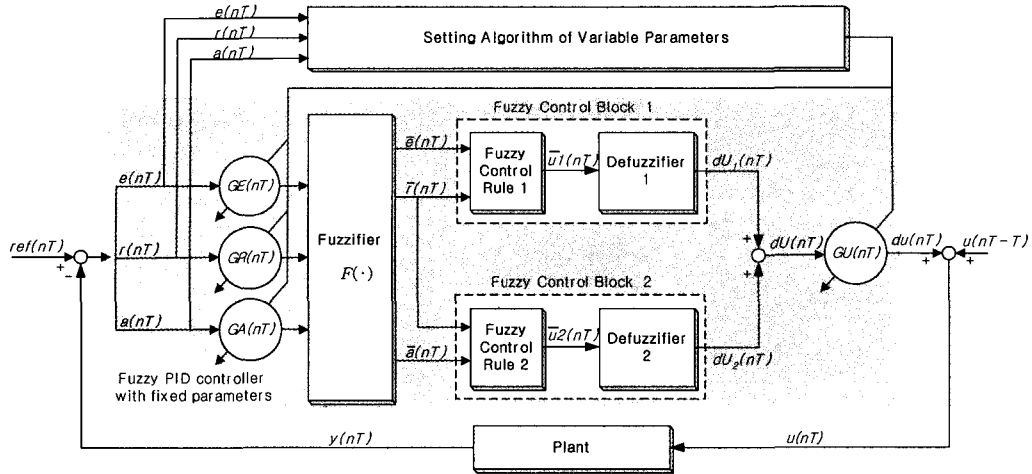


그림 1. 가변 파라미터를 갖는 퍼지 PID제어기의 구조
 Fig. 1. Structure of a fuzzy PID control system with variable parameters

로 사용하고, 퍼지 제어규칙과 비퍼지화기를 각각 포함하는 서로 다른 두 개의 퍼지 제어블록으로 구성된다.

제어기의 각 변수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 e(nT) &= ref(nT) - y(nT) & (1) \\
 e^* &= GE \times e(nT) & (2) \\
 r(nT) &= [e(nT) - e(nT - T)] / T & (3) \\
 r^* &= GR \times r(nT) & (4) \\
 a(nT) &= [r(nT) - r(nT - T)] / T \\
 &= [e(nT) - 2e(nT - T) + e(nT - 2T)] / T^2 & (5) \\
 a^* &= GA \times a(nT) & (6) \\
 dU(nT) &= dU_1(nT) + dU_2(nT) & (7) \\
 du(nT) &= GU \times dU(nT) & (8) \\
 u(nT) &= du(nT) + u(nT - T) & (9)
 \end{aligned}$$

여기서 n 과 T 는 양의 정수와 샘플링 시간, $y(nT)$, $e(nT)$, $r(nT)$, $a(nT)$ 는 각각 샘플링 시간 nT 에서 플랜트의 출력, 오차(error), 오차의 변화율(rate), 오차의 변화율의 변화율(acc)을 나타내며 GE , GR , GA , GU 는 각각 error, rate, acc, u 의 퍼지화 스케일 상수이며, 퍼지 PID제어기의 파라미터이다. dU_1 , dU_2 는 퍼지 제어블록 1, 2의 출력, u 는 제어 입력을 의미한다.

2.1.2 퍼지화 알고리즘

스케일된 입력변수와 출력변수 공간에서 정의되는 퍼지집합의 소속함수는 각각 그림 2, 그림 3과 같다. 입력변수 공간의 e^* 에서 EP와 EN, r^* 에서 RP와 RN, a^* 에서 AP, AN 각각 두 개의 퍼지집합이 정의되고, 출력변수 공간의 dU_1 에서 OP, OZ, ON, dU_2 에서 OPM, ONM의 퍼지집합이 정의된다 [3,4].

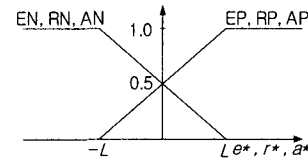


그림 2. 입력변수의 소속함수
 Fig. 2. Membership functions for input variables

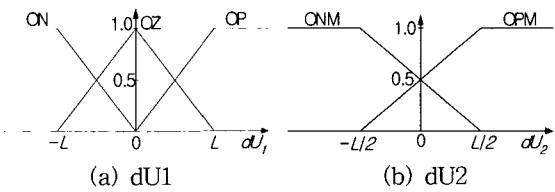


그림 3. 출력변수의 소속함수
 Fig. 3. Membership functions for output variables

2.1.3 퍼지 제어규칙

퍼지 제어블록 1과 퍼지 제어블록 2에 대한 퍼지 제어규칙은 다음과 같다[3,4].

fuzzy control block 1	
(R1) ₁ :	IF error=EP and rate=RP THEN output=OP
(R2) ₁ :	IF error=EP and rate=RN THEN output=OZ
(R3) ₁ :	IF error=EN and rate=RP THEN output=OZ
(R4) ₁ :	IF error=EN and rate=RN THEN output=ON
fuzzy control block 2	
(R1) ₂ :	IF rate=RP and acc=AP THEN output=OPM
(R2) ₂ :	IF rate=RP and acc=AN THEN output=ONM
(R3) ₂ :	IF rate=RN and acc=AP THEN output=OPM
(R4) ₂ :	IF rate=RN and acc=AN THEN output=ONM

퍼지 입력공간은 그림 4와 같다. 그림 4(a)는 제어블록 1의 e^* 와 r^* 에 대한 입력공간 분할이고, 그림 4(b)는 제어블록 2의 r^* 와 a^* 에 대한 입력공간 분할이다.

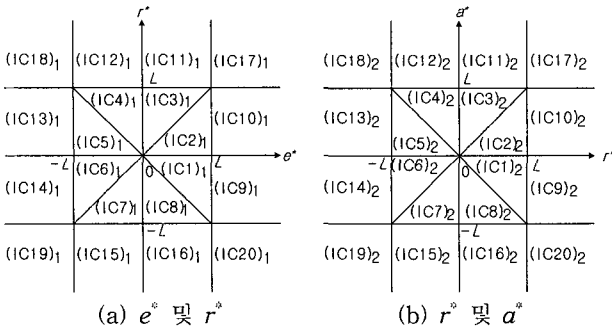


그림 4. 입력 공간 분할
Fig. 4. Partitions of input variables

2.1.4 비퍼지화 알고리즘

비퍼지화기는 식 (10)과 같은 중심평균법을 사용하였다 [5,6].

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

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

퍼지 제어블록 1에 대해 출력 퍼지집합을 L 구간 내의 영역 (IC1)1, (IC2)1, (IC5)1, (IC6)1에서 비퍼지화하면

$$IF \quad GR \times |r(nT)| \leq GE \times |e(nT)| \leq L, \quad (11)$$

$$dU_1(nT) = \frac{0.5 \times L}{2L - GE \times |e(nT)|} [GE \times e(nT) + GR \times r(nT)]$$

이 되고, 영역 (IC3)1, (IC4)1, (IC7)1, (IC8)1에서 비퍼지화하면

$$IF \quad GE \times |e(nT)| \leq GR \times |r(nT)| \leq L, \quad (12)$$

$$dU_1(nT) = \frac{0.5 \times L}{2L - GR \times |r(nT)|} [GE \times e(nT) + GR \times r(nT)]$$

이 된다.

퍼지 제어블록 2에 대해 출력 퍼지집합을 L 구간 내의 영역 (IC1)2, (IC2)2, (IC5)2, (IC6)2에서 비퍼지화하면

$$IF \quad GA \times |a(nT)| \leq GR \times |r(nT)| \leq L, \quad (13)$$

$$dU_2(nT) = \frac{0.25 \times L}{2L - GR \times |r(nT)|} [GA \times a(nT)]$$

이 되고, 영역 (IC3)2, (IC4)2, (IC7)2, (IC8)2에서 비퍼지화하면

$$IF \quad GR \times |r(nT)| \leq GA \times |a(nT)| \leq L, \quad (14)$$

$$dU_2(nT) = \frac{0.25 \times L}{2L - GA \times |a(nT)|} [GA \times a(nT)]$$

이 된다.

퍼지 제어블록 1과 퍼지 제어블록 2에서 제어기 입력이 $[-L, L]$ 을 벗어나는 경우의 출력은 표1과 같다.

따라서 FLC의 출력 $dU(nT)$ 는 식 (15)와 같이 $dU_1(nT)$ 와 $dU_2(nT)$ 의 산술적인 합이 되고, 제어신호의 증분 $du(nT)$ 는 식 (16)과 같이 GU 를 곱하여 생성한다.

$$dU(nT) = dU_1(nT) + dU_2(nT) \quad (15)$$

$$du(nT) = GU \times dU(nT) \quad (16)$$

표 1. 제어기 입력이 $[-L, L]$ 을 벗어난 경우의 증분 출력
Table 1. The incremental outputs for input combinations beyond $[-L, L]$

	Input combinations		Output	
	e^* & r^*	$dU_1(nT)$	$dU_2(nT)$	
fuzzy control block 1	(IC9) ₁ , (IC10) ₁ (IC11) ₁ , (IC12) ₁ (IC13) ₁ , (IC14) ₁ (IC15) ₁ , (IC16) ₁ (IC17) ₁ (IC18) ₁ , (IC20) ₁ (IC19) ₁			$[GR \times r(nT) + L] / 2$ $[GE \times e(nT) + L] / 2$ $[GR \times r(nT) - L] / 2$ $[GE \times e(nT) - L] / 2$ L 0 $-L$
fuzzy control block 2	r^* & a^*	(IC9) ₂ , (IC10) ₂ , (IC13) ₂ , (IC14) ₂ (IC11) ₂ , (IC12) ₂ , (IC17) ₂ , (IC18) ₂ (IC15) ₂ , (IC16) ₂ , (IC19) ₂ , (IC20) ₂		$0.5 \times GA \times a(nT)$ $0.5 \times L$ $-0.5 \times L$

2.1.5 단순화된 퍼지 PID제어기의 제어칙

표 1과 식 (11), (12)와 식 (13), (14)의 조합으로 표현되는 퍼지 PID제어기는 조건문이 많아 일반적인 PID제어기에 비해 컴퓨터 연산이 증대되는 단점을 갖고 있다. 퍼지 입력공간을 분석하여 단순화된 형태의 퍼지 PID제어기를 유도한다. 퍼지화기에 의해 생성되는 퍼지 입력공간은 표 2와 같다.

표 2. 퍼지화기에 의해 분할되는 퍼지 입력공간
Table 2. Fuzzy spaces generated by fuzzifier

	below $-L$	between $-L$ and L	above L
e^*	$-L$	$GE \cdot e$	L
r^*	$-L$	$GR \cdot r$	L
a^*	$-L$	$GA \cdot a$	L

퍼지 입력공간을 전건부로 표현하면 식 (17)과 같은 단순화된 퍼지 PID제어기 제어칙을 유도할 수 있다.

$$IF \quad GE \cdot |e| > L \quad THEN \quad GE \cdot |e| = L$$

$$IF \quad GR \cdot |r| > L \quad THEN \quad GR \cdot |r| = L$$

$$IF \quad GA \cdot |a| > L \quad THEN \quad GA \cdot |a| = L$$

$$du(nT) = K_i(nT)e(nT) + K_p(nT)r(nT) + K_d(nT)a(nT)$$

$$= \frac{0.5 \times L \times GU \times GE}{2L - \max(GE \times |e(nT)|, GR \times |r(nT)|)} e(nT)$$

$$+ \frac{0.5 \times L \times GU \times GA}{2L - \max(GE \times |e(nT)|, GR \times |r(nT)|)} r(nT)$$

$$+ \frac{0.25 \times L \times GU \times GA}{2L - \max(GR \times |r(nT)|, GA \times |a(nT)|)} a(nT) \quad (17)$$

퍼지 PID제어기는 식 (17)과 같이 일반적인 디지털 PID제어기와 동일한 구조를 갖지만 적분계인 $K_i(nT)$, 비례계인 $K_p(nT)$, 미분계인 $K_d(nT)$ 가 error, rate, acc의 값에 따라 가변되는 게인 스케줄링 기능을 갖는다.

2.2 고정 파라미터를 갖는 퍼지 PID제어기의 분석

퍼지 PID제어기는 퍼지 분할변수 L 과 스케일 파라미터 GE, GR, GA, GU 를 사용하여 정규화되고, 입력 공간 분석을 통해 연산 시간을 줄일 수 있는 간단한 형태의 제어칙으로 유도되었다. 그러나 제어기의 파라미터들이 정규화되고 고정됨으로써 퍼지 PID제어기의 성능에 한계가 발생한다. 이 절은 파라미터의 고정으로 발생하는 퍼지 PID제어기의 단점을 분석하고, 단점을 보완하여 향상된 제어 성능을 발휘할 수 있는 가변 파라미터를 갖는 퍼지 PID제어기를 제안한다. 고정 파라미터를 갖는 퍼지 PID제어기가 안고 있는 문제점은 다음 2가지가 있다[4].

(1) 스케일 파라미터 GE, GR, GA, GU 와 퍼지 분할변수 L 에 의한 입력공간의 제한

퍼지 PID제어기는 스케일된 제어기 입력 e^*, r^*, a^* 가 그림 5의 \circ 영역과 같이 L 보다 매우 작은 경우 선형 PID제어기와 비슷한 성능을 보이고, 스케일된 제어기 입력의 크기가 L 에 근접한 경우 그림 6과 같은 게인 스케줄링에 의해 선형 PID제어기에 비해 나은 성능을 보인다. 스케일된 제어기 입력의 크기가 L 값을 벗어나는 경우 PID제어동작이 효능을 발휘하지 못하고 퍼지 분할변수와 스케일 파라미터에 의해 제어기 입력이 퍼지 분할변수 L 또는 $-L$ 로 제한된다. 제어기 입력이 제한되면 충분한 제어기 출력 즉, 플랜트 제어입력이 인가되지 못하고 선형시스템의 경우 상승시간을 지연시키거나 과도응답이 나타나는 결과를 가져오고, 비선형 시스템의 경우 시스템이 불안정해질 수 있다.

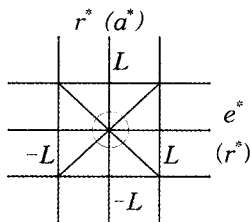


그림 5. 퍼지 입력공간
Fig. 5. Fuzzy input space

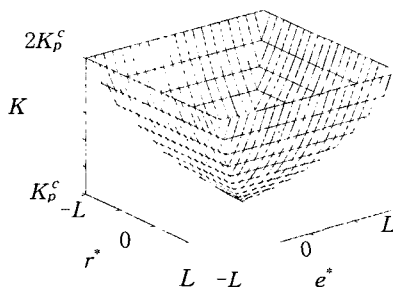


그림 6. [-L, L] 사이의 게인 스케줄링
Fig. 6. Gain scheduling within [-L, L]

(2) P, I, D 제어동작 사이의 불균형

제어기 입력 변수 e^*, r^*, a^* 의 크기가 다르고 L 을 벗어나는 경우, P, I, D 동작은 각각 L 로 균일하게 나타난다. 제어 입력 결정 시, 가장 큰 제어기 입력에 대한 보상이 제대로 이루어지지 못하고 상황에 따른 정확한 제어 동작이 수행되지 못하게 되어 일반적인 PID제어기에 비해 P, I, D 제어동작 사이에 불균형이 발생한다.

이러한 고정 파라미터를 갖는 퍼지 PID제어기의 성능 저하는 퍼지 PID제어기 자체의 문제보다는 퍼지 입력공간이 고정되어 나타나는 현상이다.

2.3 퍼지 PID제어기의 파라미터 가변

2.2절에서 언급한 입력공간의 제한 문제와 P, I, D 제어동작 사이의 불균형 문제는 L 을 크게 설계하여 해결할 수 있지만, 제어기의 작동영역이 L 에 비해 작아짐으로써 선형 디지털 PID제어기에 비해 우월한 성능을 기대하기 어렵게 된다. 그러므로 제어기의 작동영역에 따라 제어기의 입력공간을 조정하는 것이 필요하다.

제어기의 입력공간을 조정할 수 있는 파라미터는 퍼지 분할 변수 L 과 스케일 파라미터 GE, GR, GA, GU 이다. 본 논문은 스케일 파라미터 GE, GR, GA, GU 를 가변하는 방법을 제안한다. 퍼지 PID제어기의 파라미터를 가변하는 파라미터 가변 알고리즘은 그림 7과 같다.

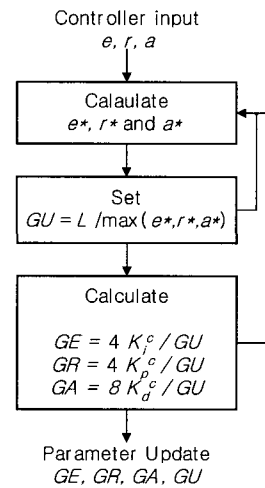


그림 7. 파라미터 가변 알고리즘
Fig. 7. Setting algorithm of variable parameters

스케일 파라미터 GE, GR, GA, GU 는 식 (19)를 만족하는 범위 안에서 가변된다.

$$\frac{GU \cdot GE}{4} = K_i^c, \frac{GU \cdot GR}{4} = K_p^c, \frac{GU \cdot GA}{8} = K_d^c \quad (19)$$

여기서, K_i^c, K_p^c, K_d^c 는 제어시스템의 BIBO 안정도를 보장하는 선형디지털 PID제어기의 게인이다.

식 (19)는 소이득정리[7,8]를 통해 안정한 선형 디지털 PID제어기로부터 안정한 퍼지 PID제어기의 파라미터를 구하기 위해 유도된 것이다[4,9,10]. 식 (19)를 통해 구한 파라미터를 갖는 퍼지 PID제어기의 높은 정상상태에서 선형 디지털 PID제어기의 놈과 같게 되고, 제어기의 노옴과 플랜트의 노옴의 곱이 1보다 작으면 제어시스템이 안정하다는 소이득정리에 의해 퍼지 PID제어기로 구성된 제어시스템은 선형 디지털 PID제어기로 구성된 제어시스템과 동일한 안정도를 갖게 된다[4]. 그러므로, 제어기의 파라미터가 가변되더라도 제어기의 놈은 일정하고, 제어시스템의 안정도도 일정하게 유지된다.

3. 시뮬레이션 및 고찰

제안한 퍼지 PID제어기의 성능을 검증하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 먼저 디지털 PID제어기의 K_p^d , K_i^d , K_d^d 를 결정한 후, 식 (19)를 통해 퍼지 PID제어기의 파라미터를 결정한다.

3.1 선형 시스템에 대한 적용

식 (20)과 같은 전달함수를 갖는 시스템은 부족감쇠 성질을 갖는 안정한 2차 선형시스템으로 단순 피드백에 의한 단위 계단입력에 대한 응답은 그림 8과 같다.

$$G(s) = \frac{10}{s(s+1)} \quad (20)$$

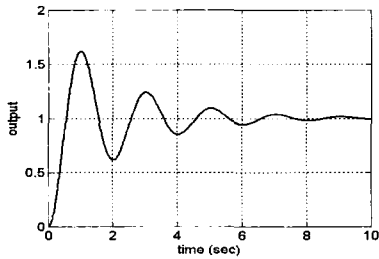


그림 8. 선형 시스템의 단순 피드백 단위 계단응답
Fig. 8. Unit step response of nominal closed-loop system

목표값 0.5, 1, 3, 6에 대한 선형 디지털 PID제어기, L 이 300과 900인 고정 파라미터를 갖는 퍼지 PID제어기, 가변 파라미터를 갖는 퍼지 PID제어기의 응답은 그림 9와 같고, 사용한 제어기 파라미터는 표 3과 같다.

고정 파라미터를 갖는 퍼지 PID제어기의 L 은 $GE \times e = L$ 로부터 구한다. $L=300$ 인 경우 오차 1이하에서 적분에 대한 계인 스케줄링이 작용하고, $L=900$ 인 경우 오차 3이하에서

적분에 대한 계인 스케줄링이 작용한다. L 이 300인 퍼지 PID제어기는 목표값 1에서 L 이 900인 퍼지 PID제어기는 목표값 3에서 최적의 성능을 발휘한다.

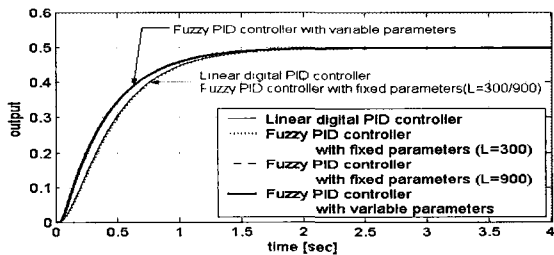
표 3. 선형 시스템의 시뮬레이션에 사용한 제어기 파라미터
Table 3. Parameters of controllers for linear system simulations

	Parameters							
	K_p^f	K_i^f	K_d^f	GE	GR	GA	GU	L
Linear digital PID controller	75	37.5	3.75					
Fuzzy PID controller with fixed parameters				300	150	30	1	300
				300	150	30	1	900
Fuzzy PID controller with variable parameters	(initial value)	variable						300
		300	150	30	1			

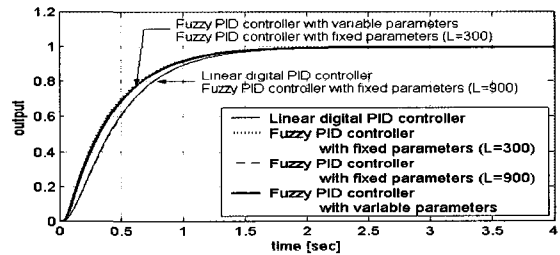
그림 9(a)의 목표값이 0.5인 경우, 가변 파라미터를 갖는 퍼지 PID제어기는 설계조건보다 작은 입력 범위에서 파라미터가 가변되어 그림 10처럼 계인 스케줄링이 작용하여 빠른 응답을 보인다. 그러나 고정 파라미터를 갖는 퍼지 PID제어기는 설계조건보다 작은 영역에서 그림 10과 같이 계인 스케줄링이 감소하여 선형 디지털 PID제어기와 동일한 응답을 보인다.

그림 9(b)의 목표값이 1인 경우, 가변 파라미터를 갖는 퍼지 PID제어기와 L 이 300인 고정 파라미터를 갖는 퍼지 PID제어기는 계인 스케줄링이 작용하여 선형 디지털 PID제어기에 비해 우월한 성능을 나타내지만 L 이 900인 고정 파라미터를 갖는 퍼지 PID제어기는 계인 스케줄링이 감소하여 선형 디지털 PID제어기와 동일한 성능을 나타낸다.

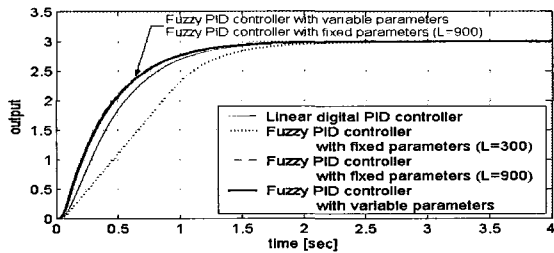
그림 9(c)의 목표값이 3인 경우, L 이 300인 고정 파라미터를 갖는 퍼지 PID제어기는 목표값이 증가함에 따라 L 을 벗어난 FLC입력에 대하여 입력이 제한되어 초기에 충분한 제어입력을 생성하지 못하고 선형 디지털 PID제어기에 비해 상승시간이 지연된다. 가변 파라미터를 갖는 퍼지 PID제어



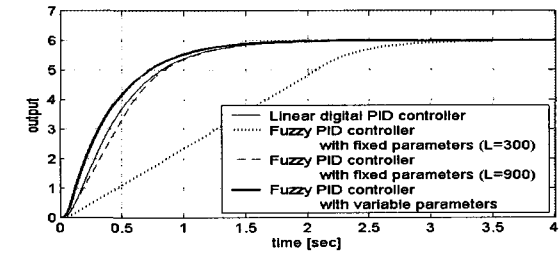
(a) in case of reference 0.5



(b) in case of reference 1.0



(c) in case of reference 3.0



(d) in case of reference 6.0

그림 9. 선형 시스템에 대한 제어기의 응답

Fig. 9. Response curves of controllers for linear system simulations

기와 L 이 900인 고정 파라미터를 갖는 퍼지 PID제어기는 개인 스케줄링이 작용하여 선형 디지털 PID제어기보다 나은 제어 성능을 나타낸다.

그림 9(d)의 목표값이 6인 경우, 목표값이 증가함에 따라 L 이 300인 고정 파라미터를 갖는 퍼지 PID제어기에서 그림 11의 ㉠와 같은 퍼지 입력공간을 초과하여 개인 스케줄링이 작용하지 않는 영역이 증가하여 상승시간은 더욱 지연되고, L 이 900인 고정 파라미터를 갖는 퍼지 PID제어기에서 그림 11의 ㉡와 같은 퍼지 입력공간이 제한되어 개인 스케줄링이 작용하지 않는 영역이 나타나 상승시간이 지연되기 시작한다. 그러나, 가변 파라미터를 갖는 퍼지 PID제어기는 그림 11에서 보는 것처럼 개인 스케줄링이 지속적으로 작용하여 빠른 응답을 나타낸다.

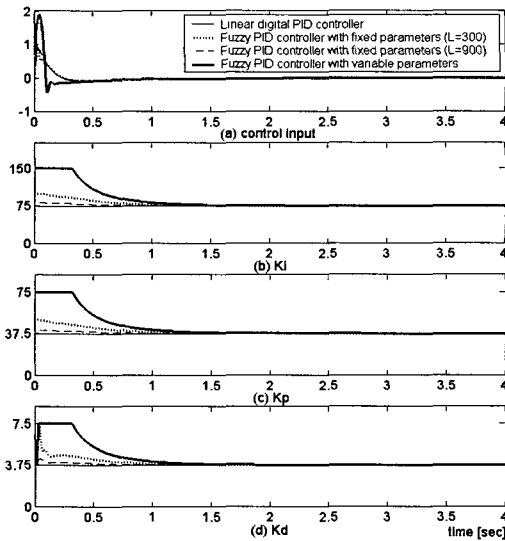


그림 10. 목표값 0.5에 대한 제어입력과 개인 스케줄링
Fig. 10 A control input and gain scheduling in case of reference 0.5

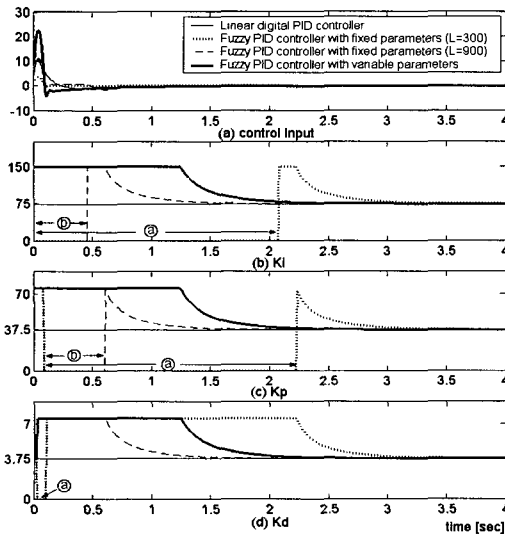


그림 11. 목표값 6에 대한 제어입력과 개인 스케줄링
Fig. 11. A control input and gain scheduling in case of reference 6

3.2 비선형 시스템에 대한 적용

식 (21)의 시스템은 그림 12와 같이 단순 피드백을 통한 단위 계단입력에 대한 시스템의 출력은 목표값에 수렴하지 못하고 발산하는 불안정한 시스템이다.

$$\ddot{y} + \dot{y} = 0.5y^2 + 2u \quad (21)$$

목표값 1, 10, 30, 35에 대한 선형 디지털 PID제어기, L 이 1500과 3000인 고정 파라미터를 갖는 퍼지 PID제어기, 가변 파라미터를 갖는 퍼지 PID제어기의 응답은 그림 13과 같고, 시뮬레이션에 사용한 제어기의 파라미터는 표 4와 같다.

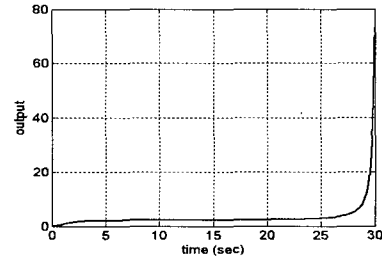


그림 12. 비선형 시스템의 단위 계단응답
Fig. 12 Unit step response of the nonlinear system

표 4. 비선형 시스템의 시뮬레이션에 사용한 제어기 파라미터

Table 4 Parameters of controllers for nonlinear system simulations

	Parameters							
	K_f^c	K_p^c	K_d^c	GE	GR	GA	GU	L
Linear Digital PID Controller	25	20	2.5					
Fuzzy PID Controller with Fixed Parameters				100	80	20	1	1500
				100	80	20	1	3000
Fuzzy PID Controller with Variable Parameters	(initial value)			variable				150
				100	80	20	1	

고정 파라미터를 갖는 퍼지 PID제어기의 L 은 목표값 15 이하와 30이하에서 적분 개인 스케줄링이 작용하도록 1500과 3000을 선정하였다.

그림 13(a), (b)의 목표값이 1이나 10인 경우, 선형 디지털 PID제어기와 퍼지 PID제어기 모두 비슷한 제어 성능을 나타내지만 가변 파라미터를 갖는 퍼지 PID제어기가 조금 더 부드러운 응답을 보인다.

그림 13(c)의 목표값이 30인 경우, 선형 디지털 PID제어기는 오버슈트와 함께 안정한 부족감쇠가 된다. L 이 1500인 고정 파라미터를 갖는 퍼지 PID제어기는 설계조건을 넘어서는 입력에 대하여 퍼지 입력 공간이 제한되어 그림 14의 ㉠처럼 개인 스케줄링이 작동하지 않아 초기에 충분한 제어입력을 생성하지 못하고 오버슈트가 크게 발생하고 있다. L 이 3000인 고정 파라미터를 갖는 퍼지 PID제어기는 부분적으로 그림 14의 ㉡처럼 개인 스케줄링이 작동하지 않는 영역이 존재하고 작은 오버슈트가 발생한다. 가변 파라미터를 갖는 퍼지 PID제어기는 그림 14에서 보는 것처럼 처음부터 개인 스케줄링이 지속적으로 작동하여 안정한 응답을 보인다.

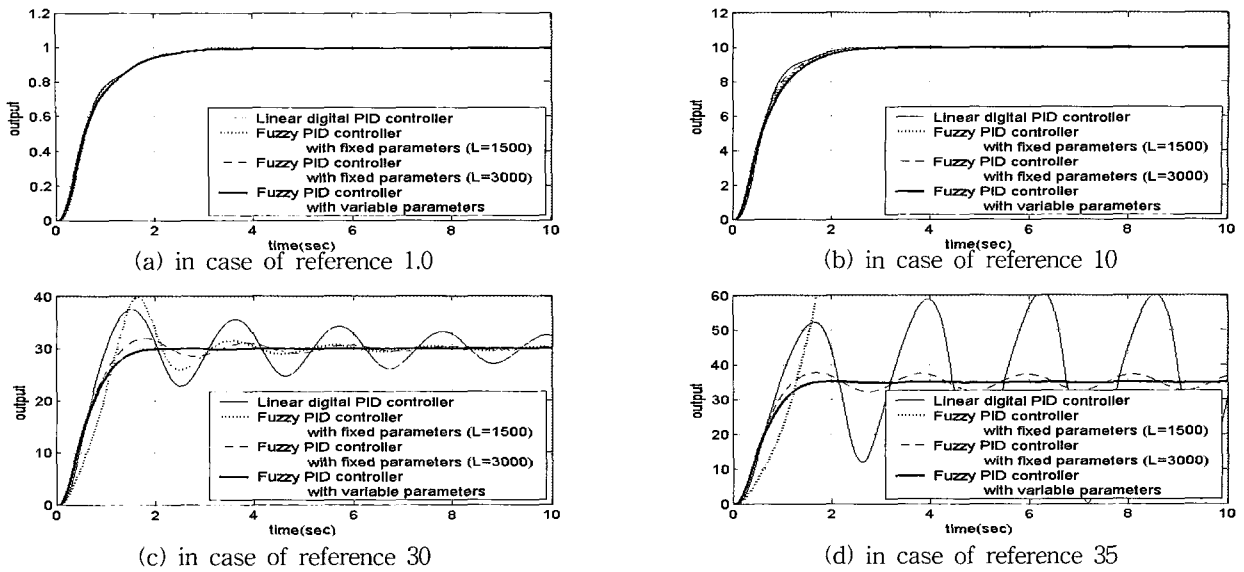


그림 13. 비선형 시스템에 대한 제어기의 응답
Fig. 13. Response curves of controllers for nonlinear system simulations

그림 13(d)의 목표값이 35인 경우, 선형 디지털 PID제어기는 발산하기 시작한다. L 이 1500인 고정 파라미터를 갖는 퍼지 PID제어기는 퍼지 입력공간이 제한되어 충분한 제어 입력을 생성하지 못하고 초기에 발산하고, L 이 3000인 고정 파라미터를 갖는 퍼지 PID제어기는 정상상태에서 진동하는 안정한 부족감쇠가 되지만, 가변 파라미터를 갖는 퍼지 PID제어기는 지속적인 게인 스케줄링을 통해 임계감쇠가 된다.

간 지연, 제어시스템의 불안정성 등을 개선하기 위해 제어기의 파라미터를 가변하는 퍼지 PID제어기를 제안하고 설계절차를 기술한 후 시뮬레이션을 통해 제어성능을 확인하였다. 설계된 가변 파라미터를 갖는 퍼지 PID제어기에 대하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 소이득정리를 통해 유도된 안정 조건을 만족하는 범위 안에서 스케일 파라미터 GE, GR, GA, GU를 가변하여 제어기의 입력공간을 조정함으로써 전체시스템에 대한 BIBO 안정도를 만족한다.
- (2) 고정 파라미터를 갖는 퍼지 PID제어기는 목표값에 따라 L 을 적절히 변경해야만 향상된 제어성능을 얻을 수 있지만, 가변 파라미터를 갖는 퍼지 PID제어기는 제어기 입력공간에 상관없이 게인 스케줄링이 작동하여 우수한 제어 성능을 발휘한다.

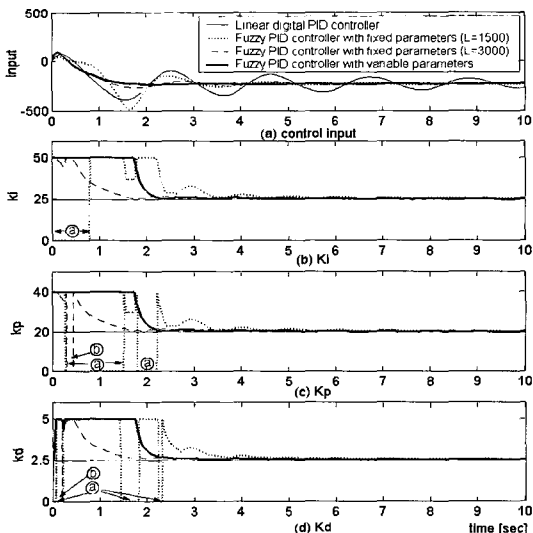


그림 14. 목표값 30에 대한 제어입력과 게인 스케줄링
Fig. 14. A control input and gain scheduling in case of reference 30

4. 결 론

본 논문은 고정 파라미터를 갖는 퍼지 PID제어기에서 입력공간이 제한되어 발생하는 제어입력 제한으로 인한 상승시

참 고 문 헌

- [1] Z. Y. Zhao, M. Tomizuka and S. Isaka, "Fuzzy Gain Scheduling of PID Controllers," *IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics*, Vol. 23, pp. 1392~1398, 1993.
- [2] C. W. de Silva, *Intelligent Control: Fuzzy Logic Applications*. New York CRC, 1995.
- [3] J. H. 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.
- [4] 이병걸, 김인환, 김종화, "고정 파라미터를 갖는 단순화된 퍼지 PID제어기의 제안과 안정도 분석," *한국퍼지 및 지능 시스템학회 논문지*, Vol. 14, No. 7, pp. 807~815, 2004.

- [5] K. M. Passino and S. Yurkovich, *Fuzzy Control*, Addison Wesley, 1999.
 - [6] L. Wang, *A Course in Fuzzy Systems and Control*, Prentice-Hall, 1997.
 - [7] C. A. Desoer and M. Vidyasagar, *Feedback Systems: Input-Output Properties*, New York Academic, 1975.
 - [8] R. J. P. de Figueiredo and G. Chen, *Nonlinear Feedback Control Systems: An Operator Approach*, New York Academic, 1993.
 - [9] A. Heidar, M. H. Li and G. Chen, "New Design and Stability Analysis of Fuzzy Proportional-Derivative Control Systems," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Vol. 2, pp 245~254, 1994.
 - [10] G. Chen and H. Ying. "Stability Analysis of Nonlinear Fuzzy PI Control Systems," *Proceeding of 3rd International Conference on Fuzzy Logic Application*, pp. 128~133, 1993.
-

저 자 소 개

이병걸 (Byungkyul Lee)

2005년 : 한국해양대학교 대학원 제어계측공학과(공학박사)

김인환 (Inhwan Kim)

제 14권 7호(2004년 12월호) 참조

김종화 (Jonghwa Kim)

제 14권 7호(2004년 12월호) 참조