

論文99-36C-12-8

간편 간접추론방법을 이용한 퍼지 디지털 PID 제어기의 설계

(Design of Fuzzy Digital PID Controller Using Simplified Indirect Inference Method)

蔡 昌 鉉 *

(Chang-Hyun Chai)

要 約

본 논문에서는 간편 간접추론방법을 이용한 퍼지 디지털 PID 제어기의 설계 방법을 제안하였다. 제안된 퍼지 제어기는 선형 디지털 PID 제어기에서 유도하였으며, 간편 간접추론을 이용한 퍼지화부, 제어규칙 베이스 및 비퍼지화부의 설계방법을 설명하였다. 제안된 퍼지 제어기는 종래의 디지털 PID 제어기를 기초로 설계하였으므로 구조를 이해하기 쉽고 퍼지입력에 의한 비선형 특성을 가지므로 선형 및 비선형 플랜트에 적응 능력을 가진다. 또한 각 입력변수 별로 간편 간접추론방법을 사용하여 추론하므로 고속 추론이 가능하고 퍼지규칙의 수가 증가하여도 쉽게 적용 가능하다. 제안된 제어기의 성능을 D. Misir 등이 사용한 선형 및 비선형 플랜트에 모의 실험하여 효용성을 입증하였다.

Abstract

This paper describes the design of fuzzy digital PID controller using simplified indirect inference method. First, the fuzzy digital PID controller is derived from the conventional continuous time linear digital PID controller. Then the fuzzification, control-rule base, and defuzzification using SIIM in the design of the fuzzy digital controller are discussed in detail. The resulting controller is a discrete time fuzzy version of the conventional digital PID controller, which has the same linear structure, but are nonlinear functions of the input signals. The proposed controller enhances the self-tuning control capability, particularly when the process to be controlled is nonlinear. When the SIIM is applied, the fuzzy inference results can be calculated with splitting fuzzy variables into each action component and are determined as the functional form of corresponding variables. So the proposed method has the capability of the high speed inference and adapting with increasing the number of the fuzzy input variables easily. Computer simulation results have demonstrated the superior to the control performance of the one proposed by D. Misir et al.

I. 서 론

PID 제어기는 구조가 간단하고 실현이 용이하며, 대부분의 산업체 기술자들이 제어기의 운전과 동조에 대하여 많은 경험이 있어 산업체에서 주로 사용되고 있다.

그러나 제어대상 플랜트가 큰 지연시간(time delay)이나 심한 비선형 특성을 가지는 경우 또는 미지의 매개 변수를 가지는 플랜트에 대해 안정도 및 견실성을 보장하도록 제어기의 매개변수를 적절히 동조하기에는 많은 어려움이 따른다.

PID 제어기의 견실성을 보장하는 접근법으로 불안정한 상황이 발생하면 현장 기술자의 경험적 지식을 활용할 수 있는 퍼지이론 등이 있다. Zadeh^[1] 등에 의해 제안된 퍼지이론^[2] Marandani^[3]에 의해 제어시스템에

* 正會員, 金烏工科大學校 電子工學部

(School of Electronic Eng., KNUT)

接受日字: 1999年6月7日, 수정완료일: 1999年11月9日

응용된 아래, 퍼지제어는 플랜트의 동특성에 대한 상세한 정보나 지식이 없어도 경험적인 수치 지식과 언어 정보를 이용하여 효과적인 제어를 수행할 수 있으므로 플랜트의 수학적 모델화가 어렵거나 부분적으로 불가능할 경우, 입출력 변수의 수가 아주 많아 기존의 제어 방법으로 다루기 곤란한 경우, 시스템은 간단하지만 기존의 선형적 제어기법에 의한 성능 향상에 한계가 있는 분야에 주로 적용되어, 실제로 많은 성공 사례들이 보고되고 있다^[3].

퍼지제어의 설계에 관한 연구는 일반적으로 의미상의 퍼지 PI/PD 제어기 시스템에 대한 연구가 주로 진행되었으나, 퍼지 PI 제어기는 과도상태 성능 향상에 대한 한계가 지적되었고^[4], 퍼지 PD 제어기는 정상상태 오차를 줄일 수 없다는 한계가 지적되고 있다^[5]. 최근 퍼지제어의 성능을 향상시키기 위한 방법으로 규칙 테이블을 자동 조정하기 위한 자기구성 제어기(SOC)의 구성, 목적함수를 이용한 적응퍼지 제어기법, 신경망의 학습 기능을 이용한 퍼지-신경망 제어기법, 퍼지 패턴 공간의 분할을 통하여 퍼지 규칙의 자동 생성에 이용하고자 하는 퍼지 공간 분할 방법, 퍼지 논리와 기존 제어기를 혼합하여 사용하는 Hybrid 제어 기법 등이 활발히 논의되고 있다^[6].

또한, 1993년 Z. Y. Zhao 등^[6]이 퍼지논리에 의한 퍼지 PID 이득 조정기를 제안한 아래 퍼지 PID 제어기에 대한 연구도 급속히 진행되어, 1990년 H. Ying 등^[7,8]은 2개의 퍼지 입력변수와 4개의 퍼지규칙, 비선형 비퍼지화를 적용하여 20개의 제어입력 영역으로 분할되는 비선형 퍼지 PI 제어기를 제안하였는데, 1994년 Malki 등^[9~11]은 디지털 PID 제어기의 선형 모델을 기초로 Ying 등의 퍼지 PID 제어기를 재설계하였다. Malki 등의 퍼지 PID 제어기는 선형 디지털 PID 구조에 기초로 선형 구조의 비선형 시변 매개변수 이득이 되도록 설계하여, 선형뿐만 아니라 비선형 플랜트에 대해 좋은 제어 성능을 가진다는 것을 입증하였다. 또한 퍼지화부, 퍼지규칙 및 비퍼지화의 전 과정이 최종 퍼지 제어입력의 생성에 관한 식으로 표현되어 수행시간(processing time)이 단축되는 장점 등이 있다. 그러나, 제어입력이 퍼지 입력의 조합에 의한 20개의 영역으로 분할되고, 퍼지입력변수의 수가 증가하면 적용하기 어려워 퍼지 PI+D 또는 퍼지 PD+I 형의 제어기로 구현되도록 제한된다. 1995년 H. X. Li 등^[12]은 가속도 오차를 사용하지 않은 Hybrid 속도형 퍼지PI/위치형 퍼지PD 제어기를 제안하

였으나, 하나의 규칙 테이블에 의해 생성되는 제어입력을 출력 조절계수만으로 퍼지 PI와 퍼지 PD 논리를 조정해야 하므로 성능 향상에 한계가 있다. 1996년 Santos 등^[13]은 3개의 입력변수(오차, 속도오차 및 가속도 오차)와 8개의 퍼지규칙을 사용하는 퍼지 PID 제어기를 제안하였으나, 입력변수 공간이 48개의 영역으로 분할되어 적용하기 어려운 단점이 있다. 또한 Otsubo 등^[14]은 3개의 입력변수와 6개의 퍼지규칙을 사용하는 퍼지 PID 제어기를 간편간접추론방법(Simplified Indirect Inference Method : SIIM)을 사용하여 설계하고 퍼지 스윗칭 제어규칙에 따라 기존의 PID 제어기와 병행 사용하는 Hybrid 퍼지 PID 제어기를 제안하였으나, 정상상태에서 동작하는 기존 PID 제어기를 최적 동조해야 하는 문제점이 있다. 1997년 C. Li 등^[15]은 3개의 입력변수와 8개의 퍼지규칙을 사용하고 신경망으로 학습하는 자기학습 PID 제어기를 설계하였으며, C. Liu 등^[16]은 제어입력 공간분할에 의한 퍼지 PID 제어기를 설계하였으나, 퍼지 제어입력을 구하기 위하여 적분을 수행하여야 하는 단점이 있다. 1998년 Jeong 등^[17]은 Lyapunov 함수와 퍼지논리를 이용하여 퍼지 PID 제어기의 이득 조정기를 설계하였는데, 퍼지규칙의 수가 7x6x4로 너무 많아지는 단점이 있다.

본 논문에서는 퍼지 디지털 PID 제어기를 설계하고, Misir 등^[11]의 20개로 분리된 제어입력영역을 간편 간접추론방법(Simplified Indirect Inference Method:SIIM)을 사용하여 구현하였다. 제안된 제어기는 Misir 등의 선형 디지털 PID 제어기의 구조를 사용하며, 6개의 간단한 퍼지 If-Then 규칙으로 구성된다. 제어기의 퍼지화부는 2개의 단조증가 선형함수를 사용하였고, 단조증가 비선형 비퍼지화를 적용한 후 가중치 결합으로 제어입력을 생성한다. 제안된 퍼지 디지털 PID 제어기는 다음과 같은 장점을 가진다. 첫째, 종래의 선형 디지털 PID 제어기를 기초로 퍼지 제어기를 설계하므로 구조를 이해하기 쉽고, 오차의 가속도 성분을 사용하지 않는 장점이 있다. 둘째, 퍼지 디지털 PID 제어기의 제어입력이 비선형 함수의 비퍼지화로 결정되므로 선형 및 비선형 플랜트에 우수한 적응능력을 가진다. 셋째, 간편 간접추론방식은 퍼지 제어기의 입력변수 별로 추론하므로 고속 추론이 가능하고, 입력변수의 증가에 따른 퍼지규칙의 수가 증가하여도 쉽게 적용 가능하다. 제안된 제어기의 성능을 고찰하기 위하여 D. Misir 등^[11]이 사용한 예제를 대상으로 모의 실험하여 효용성을 입증

하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 디지털 PID 제어기를 유도하여 퍼지제어기의 입출력 변수를 정의하였고, 3장에서는 간편간접추론방식에 의한 퍼지 디지털 PID 제어기를 구성하였다. 4장에서 제안된 제어기의 성능을 고찰하기 위하여 D. Misir 등이 사용한 예제를 보의실험하였고, 5장에서는 결론을 유도하였다.

II. 디지털 PID 제어기와 퍼지 입출력변수의 결정

아날로그 PID 제어기의 구조는 그림 1과 같다. 그림 1의 아날로그 PID 제어 알고리즘에 대해 디지털 PID 제어 알고리즘을 유도한 후^[21], 퍼지 입출력변수를 결정 한다.^[11]

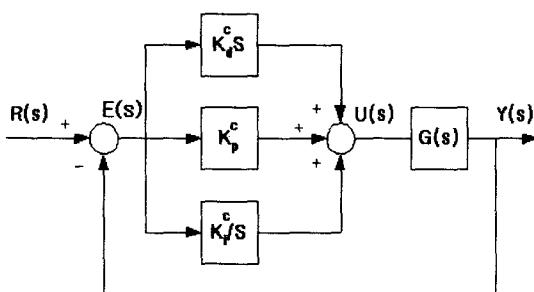


그림 1. 아날로그 PID 제어 시스템
Fig. 1. Analog PID control system.

그림 1에서 아날로그 PID 제어기의 출력은 식(1)로 주어진다.

$$u_{PID}(s) = \left(K_p^c + \frac{K_i^c}{s} + K_d^c s \right) E(s) \quad (1)$$

여기서 K_p^c 는 PID 제어기의 비례이득(proportional gain)이고, K_i^c 는 적분이득(integral gain)이고, K_d^c 는 미분이득(derivative gain)이며, $E(s)$ 는 오차신호(error signal)이다.

식(1)의 방정식에서 적분항 ($1/s$)은 사다리꼴 적분법(trapezoidal integration)을 사용하고, 미분항 (s)은 역방향 차분 방정식(backward difference equation)을 사용하여 이산 식(discrete equation)으로 표현한 k step에서의 PID 제어 알고리즘은 식(2)와 같다.

$$\begin{aligned} u(k) = & K_p^c e(k) + K_i^c T \left[\frac{1}{2} [e(0) + e(1)] + \right. \\ & \dots + \frac{1}{2} [e(k-1) + e(k)] \\ & \left. + \frac{K_d^c}{T} [e(k) - e(k-1)] \right] \end{aligned} \quad (2)$$

또한, $(k-1)$ step에서의 알고리즘은 식(3)과 같다.

$$\begin{aligned} u(k-1) = & K_p^c e(k-1) \\ & + K_i^c T \left[\frac{1}{2} [e(0) + e(1)] + \dots \right. \\ & \left. + \frac{1}{2} (e(k-2) + e(k-1)) \right] \\ & + \frac{K_d^c}{T} [e(k-1) - e(k-2)] \end{aligned} \quad (3)$$

식(2)에서 식(3)을 빼면 식(4)와 같아 표현되고, 양변을 샘플링 주기 T 로 나누면 식(5)와 같다.

$$\begin{aligned} u(k) - u(k-1) = & K_p^c [e(k) - e(k-1)] \\ & + \frac{K_i^c T}{2} [e(k-1) + e(k)] \\ & + \frac{K_d^c}{T} [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{u(k) - u(k-1)}{T} = & K_p^c \frac{[e(k) - e(k-1)]}{T} \\ & + \frac{K_i^c}{2} [e(k-1) + e(k)] \\ & + \frac{K_d^c}{T} \frac{e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)}{T} \end{aligned} \quad (5)$$

식(5)에서 우변의 각항을 식(6)~식(8)로 정의하면 식(9)의 디지털 PID 제어 알고리즘을 구할 수 있다.

$$e_v = \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \quad (6)$$

$$e_p = [e(k) + e(k-1)] \quad (7)$$

$$e_a = \frac{e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)}{T} \quad (8)$$

$$\Delta u_k = K_p e_v + K_i e_p + K_d e_a \quad (9)$$

식(9)의 우변항 $K_p e_v$, $K_i e_p$, $K_d e_a$ 는 퍼지 PID 디지털 제어기에서 퍼지 입력변수로 사용된다. 식(9)를 다시 나타내면 식(10)과 같으며, 식(10)에서 $T \Delta u(k)$ 를 퍼지 디지털 PID 제어 알고리즘의 출력 $K_{u_{pid}} \Delta u(k)$ 로 정의하고 다시 쓰면 식(11)과 같으며, $K_{u_{pid}}$ 는 퍼지 디지털 PID 제어이득으로 출력 조절계수(output scaling

factor)이다.

$$u(k) = u(k-1) + T \Delta u(k) \quad (10)$$

$$u(k) = u(k-1) + K_{u_{rm}} \Delta u(k) \quad (11)$$

전체적인 Fuzzy Digital PID 제어 알고리즘에 의한 퍼지 디지털 PID 제어시스템은 그림 2와 같다

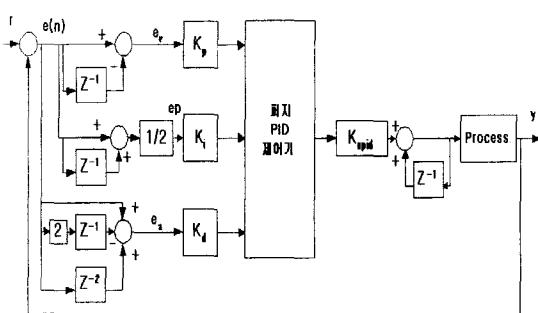


그림 2. 퍼지 디지털 PID 제어 시스템

Fig. 2. Fuzzy digital PID control system.

III. 간편 간접추론방식에 의한 퍼지 디지털 PID 제어기

간편 간접추론방식은 Y. Tsukamoto^[20]에 의해 제안된 간접추론방식(Indirect Inference Method)을 제어에 보다 용이하게 적용하기 위하여 M. Sugeno^[22]에 의해 제안되었다. 본 논문에서는 A. Otsubo 등^[14]이 사용한 SIIM 방법을 디지털 PID 알고리즘에 대해 적용한다.

1. 퍼지화(Fuzzification)

식(11)의 PID 제어 알고리즘에서 입력변수 $K_p e_r$, $K_i e_p$, $K_d e_a$ 에 대한 소속함수(Membership Function)는 그림 3과 같이 두 개의 단조증가(Monotone Increase) 선형함수의 식(12)로 정의되며, 입력변수의 소속정도 w_i 는 식(13)과 같이 결정되는데, 0과 1사이의 값이다. 그림 3과 식(12)에서 L 은 설계변수(Design Variable)로 함수 PA에서 입력변수가 L 보다 크면 함수 PA를 1로, $-L$ 보다 작으면 0으로 정의되고, 함수 NA에서는 입력변수가 L 보다 크면 0으로, $-L$ 보다 작으면 1으로 정의된다. 설계변수 L 에 대한 고찰은 4장에서 수행된다.

$$PA(x_i) = \frac{x_i + L}{2L} \quad (12)$$

$$NA(x_i) = \frac{-x_i + L}{2L}$$

$$w_{i1} = PA(x_i), \quad w_{i2} = NA(x_i) \quad (13)$$

여기서, $x_i (i=1, 2, 3)$ 은 입력변수로 $K_p e_r$, $K_i e_p$ 또는 $K_d e_a$ 이다.

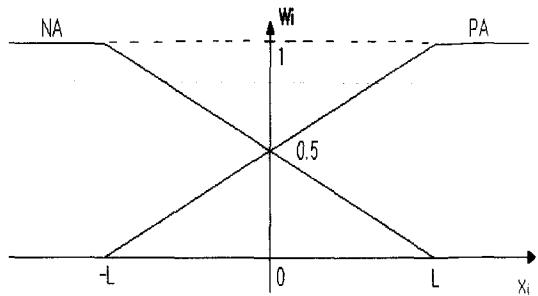


그림 3. 입력 소속함수

Fig. 3. Input membership function.

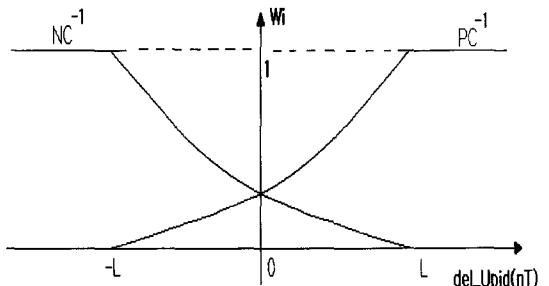


그림 4. 출력 소속함수

Fig. 4. Output membership function.

2. 퍼지 제어규칙

퍼지 제어 알고리즘에 대한 제어 규칙은 다음과 같으며, 한 개의 입력변수에 대해 각각 2개의 규칙이 사용된다.

- (R1) IF $K_p e_r$ is PA Then Δu_{i1} is PC^{-1}
- (R2) IF $K_p e_r$ is NA Then Δu_{i2} is NC^{-1}
- (R3) IF $K_i e_p$ is PA Then Δu_{i1} is PC^{-1}
- (R4) IF $K_i e_p$ is NA Then Δu_{i2} is NC^{-1}
- (R5) IF $K_d e_a$ is PA Then Δu_{i1} is PC^{-1}
- (R6) IF $K_d e_a$ is NA Then Δu_{i2} is NC^{-1}

출력변수에 관한 소속함수는 그림 4와 같은 2개의 단조증가 비선형 함수의 식 (14)으로 주어지며, 역함수 (Inverse Function)는 식 (15)와 같다.

$$PC = [4.5 - \sqrt{21.25 - (x_i/L+2)^2}]$$

$$NC = [4.5 - \sqrt{21.25 - (x_i/L-2)^2}] \quad (14)$$

$$PC^{-1} = L \times [-2 + \sqrt{21.25 - (\omega_i - 4.5)^2}]$$

$$NC^{-1} = L \times [2 - \sqrt{21.25 - (\omega_i - 4.5)^2}] \quad (15)$$

간편 간접추론방식(SIM)을 적용할 때 각 입력변수에 관한 입력의 증분 Δu_i 는 2개의 소속정도 w_{i1} 과 w_{i2} 의 함수 식(16)에서 결정된다.

$$\Delta u_{i1} = PC^{-1}(w_{i1}), \quad \Delta u_{i2} = NC^{-1}(w_{i2}) \quad (16)$$

3. 비퍼지화(Defuzzification)

식 (16)에 의해 구해진 퍼지제어 입력의 크기는 가중치 결합(Weighted-Combination)의 식 (17)을 사용하여 각 퍼지입력의 증분 Δu_i 가 결정된다.

$$\Delta u_i = \frac{w_{i1}\Delta u_{i1} + w_{i2}\Delta u_{i2}}{w_{i1} + w_{i2}} \quad (17)$$

식 (17)에 의해 결정된 퍼지 디지털 PID 제어입력의 증분 Δu_{PID} 는 식 (18)과 같다.

$$\Delta u_{PID} = \frac{1}{3}(\Delta u_1 + \Delta u_2 + \Delta u_3) \quad (18)$$

에서 퍼지 알고리즘에 의한 증분들은 3개의 변수에서 구해지므로 3으로 나눈다^[13]. 또한 퍼지 디지털 PID 제어입력의 증분을 퍼지 D 알고리즘에 의한 증분을 0으로 한 경우의 Δu_{PD} , 퍼지 P 알고리즘에 의한 증분을 0으로 한 경우의 Δu_{ID} , 퍼지 I 알고리즘에 의한 증분을 0으로 한 경우의 Δu_{PI} 로 구분하여 정규화(Normalized) 공간을 그림 5, 그림 6, 및 그림 7에 각각 도시하였다.

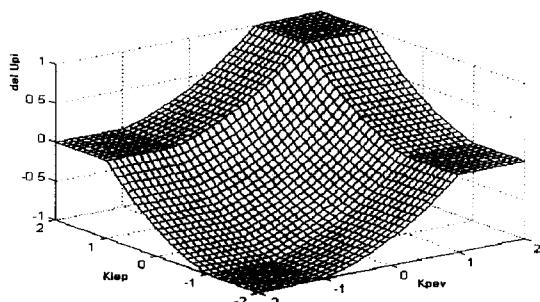


그림 5. 정규화된 Upd의 제어입력 영역
Fig. 5. Normalized Upd control input space.

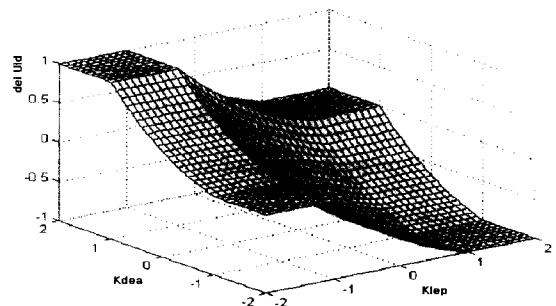


그림 6. 정규화된 Uid의 제어입력 영역
Fig. 6. Normalized Uid control input space.

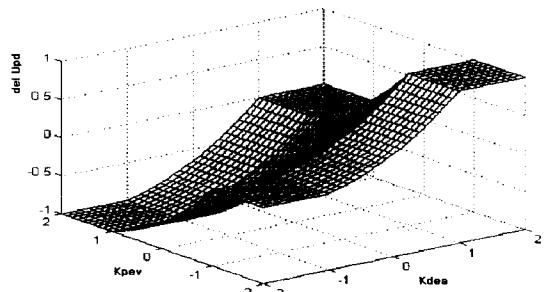


그림 7. 정규화된 Upd의 제어입력 영역
Fig. 7. Normalized Upd control input space.

IV. 모의실험 결과 고찰

제안된 퍼지 디지털 PID 제어기의 성능을 고찰하기 위하여 D. Misir 등^[11]이 사용한 예제를 모의실험하고 성능을 D. Misir 등이 제안한 퍼지 PI+D 제어기와 비교하였다. 퍼지 PID 제어기의 모든 매개변수는 D. Misir 등이 제안한 값을 그대로 사용하나, 제어성능이 좋지 못한 경우 시행착오적으로 구한 값을 사용하였다.

1. 선형 플랜트

선형 플랜트의 첫 번째 예는 식(19)의 안정한 1차 플랜트이다.

$$H(s) = \frac{1}{s+1} \quad (19)$$

식(19)의 예제에서 $K_p=1.2$, $K_i=1.0$, $K_d=0.1$ 는 입력 조절계수, $L=360$ 은 설계변수, 그리고 $K_u=1.0$ 은 출력 조절계수이다.

계단 입력에 대한 퍼지 디지털 PID 제어기의 응답을 그림 8에 나타내었다. 그림 8에서 제안된 방법이 D. Misir 등의 퍼지 PI+D 제어기에 비해 시스템의 계단응

다음은 응답속도가 빠르고 오버슈트가 없는 우수한 제어 성능을 가진다.

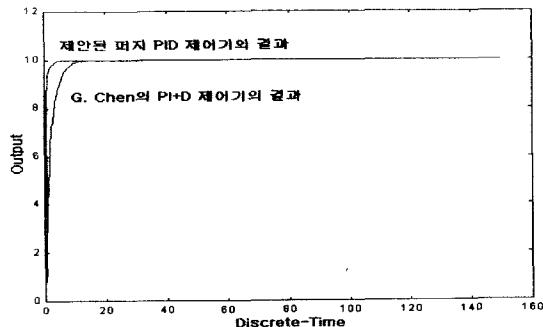


그림 8. 1차 플랜트에 대한 계단응답

Fig. 8. Step Response for first-order plant.

두 번째는 식(20)의 2차 선형 플랜트이다.

$K_p = 8.0, K_i = 1.0, K_d = 0.01, L = 1000, K_u = 0.2$ 을 매개변수로 하는 계단응답을 그림 9에 도시하였다.

$$H(s) = \frac{2}{s^2 + 4s + 3} \quad (20)$$

그림 9에서 보여주는 퍼지 디지털 PID 제어기의 응답은 정상 상태 오차나 오버슈트가 나타나지 않는 거의 완벽한 결과를 보여준다.

퍼지 디지털 PID 2차 선형 시스템의 매개변수들의 영향을 고찰하기 위하여 입력 조절계수와 출력 조절계수에 대한 영향을 그림 10, 11, 12, 13에 도시하였다.

그림 10은 K_p 를 4, 8, 10, 12로 변화시킨 경우의 계단응답으로, K_p 의 값이 적절히 선정된 8.0보다 작아질 수록 오우버 슈트가 증가하고, 상승시간이 감소하는 것을 알 수 있다. 반면 K_p 의 값이 8.0보다 커질수록 상승시간이 길어진다.

그림 11은 K_i 를 0.6, 0.8, 1, 1.5, 2로 변화시킨 경우의 계단응답을 도시한 것으로, K_i 의 값이 적절히 선정된 1.0보다 작아지면 상승시간이 길어지는 반면에 K_i 의 값이 1.0보다 커질수록 상승시간이 짧아지고 오버슈트가 발생하는 것을 알 수 있다.

그림 12는 K_d 를 0.01, 1.5, 3.0으로 변화시킨 경우의 계단응답을 도시한 것으로, K_d 의 값이 적절히 선정된 0.01보다 클수록 오버슈트가 커지고, 상승시간이 짧아지는 것을 알 수 있다.

그림 13은 설계변수 L 값의 변화에 따른 계단응답으

로, 적절히 선정된 1000보다 작아지면, 제어입력의 증분이 작게되어 상승시간이 길어지는 반면, 선정된 값보다 커지면 응답속도가 거의 변하지 않는 견실한 특성을 보이고 있다.

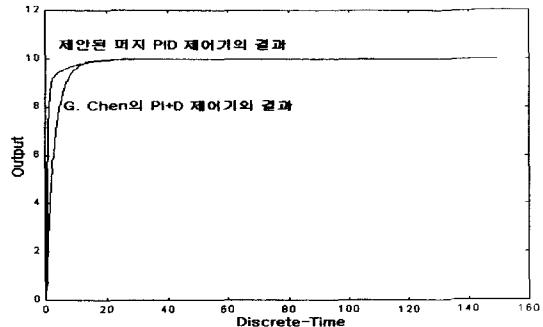


그림 9. 2차 플랜트에 대한 계단 응답

Fig. 9. Step Response for 2nd order plant.

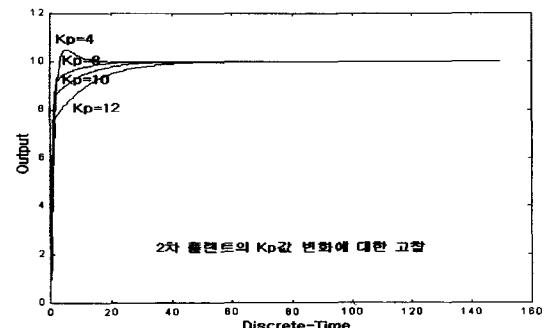


그림 10. K_p 값의 변화에 대한 응답 비교

Fig. 10. Comparison of Output with varying K_p .

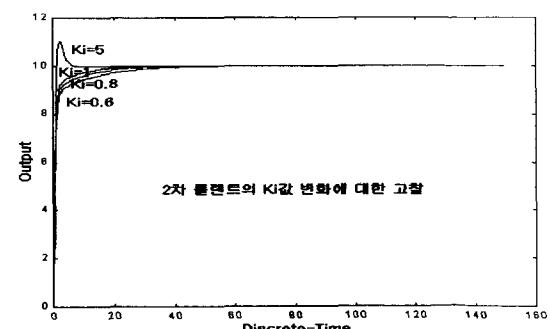


그림 11. K_i 값의 변화에 따른 응답 비교

Fig. 11. Comparison of Output with varying K_i .

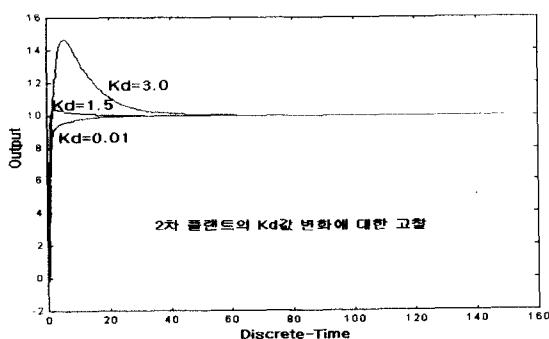


그림 12. Kd값의 변화에 대한 응답 비교
Fig. 12. Comparison of Output with varying Kd.

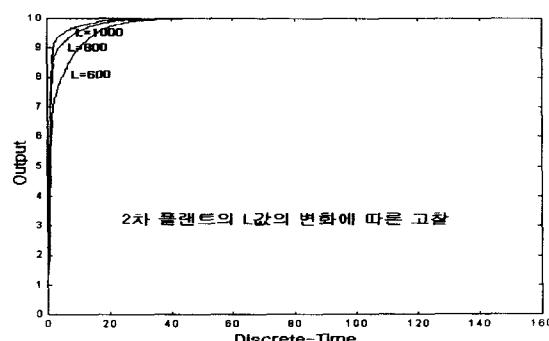


그림 13. L값의 변화에 대한 응답 비교
Fig. 13. Comparison of Output with varying L.

2. 비선형 플랜트

일반적으로 PID 제어기는 선형 저차 플랜트에 대해 좋은 제어성능을 가지도록 동조되었으므로 3차 이상의 고차 플랜트나 비선형 플랜트에서 좋은 제어성능을 기대하기 어렵다. 제안된 방법에 의한 비선형 플랜트의 첫 번째 예는 식(21)과 같다

$$\dot{y} = 0.0001|y(t)| + u_{PID}(t) \quad (21)$$

식(21)의 예에서 설정된 매개변수는 다음과 같다.

$$K_p = 1.5, K_i = 0.9, K_d = 0.1, L = 45, K_u = 0.2$$

그림 14에서 제안된 퍼지 디지털 PID 제어기에 의한 계단응답은 오우버슈트가 없고 상승시간이 짧은 완벽한 제어성능을 보이고 있다.

$$T = 0.1, K_p = 2.0, K_i = 1.0, K_d = 0.2, L = 45, K_u = 0.2$$

두 번째 비선형 플랜트는 식(22)으로 주어지며, 적절

히 설정된 매개변수는 다음과 같다.

$$\dot{y}(t) = y(t) + \sqrt{y(t)} + u_{PID}(t) \quad (22)$$

설정된 매개변수에 의한 계단응답을 그림 15에 도시하였다. 그림 15에서 제안된 퍼지 디지털 PID 제어기에 의한 계단응답은 오우버슈트가 8%, 상승시간이 0.3[sec]인 우수한 제어성능을 보이고 있다.

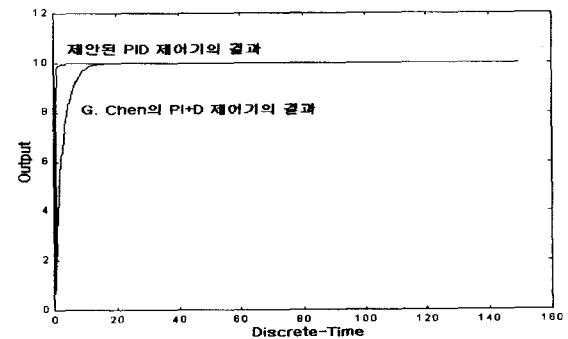


그림 14. 비선형 플랜트(1)의 계단 응답
Fig. 14. Step Response for nonlinear plant (1).

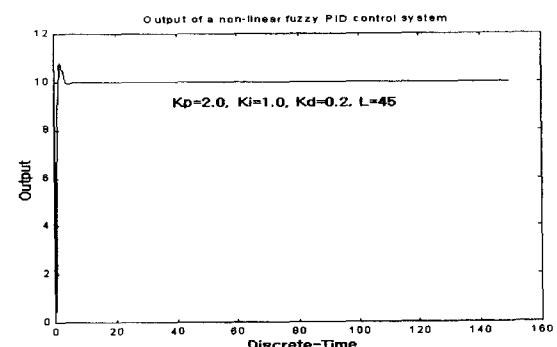


그림 15. 비선형 플랜트(2)에 대한 계단 응답
Fig. 15. Step Response for nonlinear plant (2).

V. 결 론

본 논문에서는 간편 간접추론방법을 사용하는 퍼지 디지털 PID 제어기를 설계하였다. 제안된 제어기는 선형 디지털 PID 제어기의 구조를 사용하였고, 퍼지 디지털 PID 제어기에 대해 6개의 간단한 퍼지 If-Then 규칙으로 구성된다. 제어기의 퍼지화부는 2개의 단조 선형함수를 사용하였고 단조 비선형 비퍼지화를 적용한 후 가중치 결합으로 제어입력을 생성한다. 구성된 제어

기능은 다음과 같은 장점을 가진다. 첫째, 종래의 선형 디지털 PID 제어기를 기초로 퍼지 디지털 PID 제어기를 설계하므로 구조를 이해하기 쉽다. 둘째, 퍼지 디지털 PID 제어기의 제어입력이 비선형 함수의 비퍼지화로 결정되므로 선형 및 비선형 플랜트에 우수한 적용능력을 가진다.^[7] 셋째, 간편 간접추론방식은 퍼지 제어기의 입력변수 별로 추론하므로 고속 추론이 가능하고 입력 변수의 증가에 따른 퍼지규칙의 수가 증가하여도 쉽게 적용 가능하다. 따라서, 제안된 퍼지 디지털 PID 제어기는 H. Malki 등^[8]의 퍼지 PD+I 제어기, D. Misir 등^[11]의 PI+D 제어기와는 다르게 순수한 PID 제어기의 구조를 실현한다. 제안된 제어기의 성능을 고찰하기 위하여 D. Misir 등^[11]이 사용한 선형 및 비선형 플랜트를 대상으로 모의 실험하여 보다 우수한 제어성능을 입증하였다.

추후 연구과제는 제안된 퍼지 디지털 PID 제어기의 다양한 모의 실험, 제어기의 성능을 향상시키기 위한 매개변수 최적 설정에 대한 고찰 및 BIBO 안정도 등에 관한 연구이다.

참 고 문 헌

- [1] L. A. Zadeh, "Fuzzy sets," *Information Control*, vol. 8, pp. 338-353, 1965.
- [2] E. H. Mamdani, "Application of Fuzzy Algorithm for the Control of Dynamic Plants," *Proc. IEE*, vol. 12, no. 12, 1974.
- [3] 채석, 오영석, "퍼지이론과 제어," 청문각, 1995
- [4] 이지홍, 채창현, 장점환, "퍼지 리셋기능을 갖는 PI형 퍼지 제어기," 대한전자공학회 논문지, 제30권, B편, 12호, pp. 87-97, 1993
- [5] W. Pedrycz, "Fuzzy Control and Fuzzy Systems," 2nd ed., RSP LTD., 1993.
- [6] Z. Zhao, M. Tomizuka, and S. Isaka, "Fuzzy Gain Scheduling of PID Controllers," *IEEE Trans. on Syst., Man, and Cybernetics*, vol. 23, no. 5, pp. 1392-1398, 1993.
- [7] H. Ying, W. Siler, and J. J. Buckley, "Fuzzy Control Theory : A Nonlinear Case," *Automatica*, vol. 26, no. 3, pp. 513-520, 1990.
- [8] H. Ying, "The Simplest Fuzzy Controllers using Different Inference Methods are Different Nonlinear Proportional-Integral Controllers with Variable Gains," *Automatica*, vol. 29, no. 6, pp. 1579-1589, 1993.
- [9] H. A. Malki, H. Li, and G. Chen, "New Design and Stability Analysis of Fuzzy Proportional-Derivative Control Systems," *IEEE Trans. on Fuzzy Syst.*, vol. 2, no. 4, pp. 245-254, 1994.
- [10] H. A. Malki, D. Misir, D. Feigenspan, and G. Chen, "Fuzzy PID Control of a Flexible Joint Robot Arm with Uncertainties from Time-Varying Loads," *IEEE Trans. on Cont. Syst. Tech.*, vol. 5, no. 3, pp. 371-378, 1997.
- [11] D. Misir, H. A. Malki, and G. Chen, "Design and Analysis of a Fuzzy Proportional-Integral-Derivative Controller," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 79, pp. 297-314, 1996.
- [12] H. X. Li and H. B. Gatland, "A New Methodology for Designing a Fuzzy Logic Controller," *IEEE Trans. on Syst., Man, and Cyber.*, vol. 25, no. 3, pp. 505-512, 1995.
- [13] M. Santos, S. Dormido, and J. M. de la Cruz, "Fuzzy-PID Controllers vs. Fuzzy-PI Controllers," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 79, pp. 1598-1604, 1996.
- [14] A. Otsubo, K. Hayashi, S. Murakami, and M. Maeda, "Fuzzy Hybrid Control Method Applying Simplified Indirect Inference Method," *Fifth IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems*, pp. 283-289, 1996.
- [15] C. Li and R. Priemer, "Self-learning General Purpose PID Controller," *J. Franklin Inst.* vol. 334B, no. 2, pp. 167-189, 1997.
- [16] C. Liu, J. Xu, and C. C. Hang, "Comparison Between a Fuzzy PID Controller and a Kind of Nonlinear PID Controller," *Proc. of the 36th CDC*, pp. 2736-2741, 1997.
- [17] K. C. Jeong, S. H. Kwon, D. H. Lee, and J. Y. Choi, "A Fuzzy Logic-Based Gain Tuner for PID Controllers," In Proceedings of IJCNN '98 & FUZZ-IEEE '98 ICEC '98, pp. 551-554, May. 4-9, 1998.
- [18] K. Passino, and S. Yurkovich, "Fuzzy control",

- Addison Wesley, 1988.
- [19] K. Astrom and B. Wittenmark, "Computer-Controlled Systems : Theory and Design," Prentice Hall, 1984.
- [20] Y. Tsukamoto, "Fuzzy inference," J. of Society of Instrument and Control Engineers, vol. 22-1, pp. 139-145, 1983.
- [21] Raymond G. Jacquot, "Modern Digital Control Systems," MARCEL DEKKER, INC., 1981.
- [22] M. Sugeno, "Fuzzy control," Nikkan Kogyo Pub, Tokyo, 1988.

저자소개



蔡 昌 鉉(正會員)

1956년 3월 23일생. 1980년 연세대 전기공학과 학사. 1982년 연세대 대학원 전기공학과 석사. 1989년 연세대 대학원 전기공학과 박사. 1997년 1월~1998년 1월 캘리포니아 주립대 (U.C. Davis) 교환교수. 1988년 9월~현재 금오공과대학 교 전자공학부 교수. 주관심분야는 적응제어, 지능제어, 비선형 제어 등임