

## 간편 간접추론방법을 이용한 퍼지 디지털 PI+D 제어기의 설계

### Design of Fuzzy Digital PI+D Controller Using Simplified Indirect Inference Method

채 창 현  
(Chang-Hyun Char)

**Abstract** : This paper describes the design of fuzzy digital PID controller using a 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 controller are discussed in detail. The resulting controller is a discrete-time fuzzy version of the conventional 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 that the proposed method provides better control performance than the one proposed by D. Mısıř et al.

**Keywords** : fuzzy control system, digital PID control, simplified indirect inference method

#### 1. 서론

퍼지이론은 Zadeh[1] 등에 의해 제안되고 Mamdani[2]에 의해 제어시스템에 응용되었다. 퍼지제어는 모델화가 어렵거나, 다입력-다출력 플랜트, 또는 기존의 선형적 제어기법에 의한 성능 향상에 한계가 있는 플랜트 등에 주로 적용되어 왔으며, 실제로 많은 성공 사례들이 보고되고 있다[3].

퍼지제어의 설계에 관한 연구는 일반적으로 의미상의 퍼지 PI/PD 제어기 시스템에 대한 연구가 주로 진행되었다. 그러나, 퍼지 PI 제어기는 과도상태 성능 향상에 대한 한계가 지적되고[4], 퍼지 PD 제어기는 정상상태 오차를 줄일 수 없다는 한계가 지적되고 있다[14]. 최근 퍼지제어의 성능을 향상시키기 위한 방법으로 Dual Mode에 의한 방법[20], 자기구성 제어기(SOC)의 구성, 적용퍼지 제어기법, 퍼지-신경망 제어기법, 퍼지 논리와 기존 제어기를 혼합하여 사용하는 Hybrid 제어 기법 등이 활발히 논의되고 있다[5].

한편, 1993년 Zhao 등[6]이 퍼지논리에 의한 퍼지 PID 이득 조정기를 제안한 이래 퍼지 PID 제어기에 대한 연구도 급속히 진행되었다. 1990년 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[9,10,11]은 디지털 PID 제어기의 선형 모델을 기초로 Ying 등의 퍼지 PID 제어기를 재설계하였다. Malki 등의 퍼지 PID 제어기는 선형 디지털 PID 구조를 기초로 선형 구조의 비선형 시변 매개

변수 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 퍼지입력의 조합에 의한 20개의 영역으로 분할되고, 퍼지입력변수의 수가 증가하면 적용하기 어려워 퍼지 PI+D 또는 퍼지 PD+I 형의 제어기로 구현되도록 제한된다. 1995년 Li 등[12]은 가속도 오차를 사용하지 않은 Hybrid 속도형 퍼지PI/위치형 퍼지 PD 제어기를 제안하였으나, 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 간편 간접추론방법(Simplified Indirect Inference Method : SIIM)을 사용하여 설계하고 퍼지 스윕칭 제어규칙에 따라 기존의 PID 제어기와 병행 사용하는 Hybrid 퍼지 PID 제어기를 제안하였으나, 정상상태에서 동작하는 기존 PID 제어기를 최적 동조해야 하는 문제점이 있다. 1997년 Li 등[15]은 3개의 입력변수와 8개의 퍼지규칙을 사용하고 신경망으로 학습하는 자기학습 PID 제어기를 설계하였으며, 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 제어기

의 이득 조정기를 설계하였는데, 퍼지규칙의 수가 7x6x4로 너무 많아지는 단점이 있다.

본 논문에서는 간편 간접추론방법(Simplified Indirect Inference Method : SIIM)을 사용하는 퍼지 디지털 PI+D 제어기를 설계하였다. 제안된 제어기는 PID 제어기의 구조 중에서 PI+D 구조를 사용하므로[21], 가속도 오차를 사용하지 않고 퍼지 PID 제어기를 설계할 수 있는 장점이 있다. 또한, 제안된 입출력 소속함수에 의한 간편 간접추론방법을 사용하므로 Misir 등[11]과 같이 퍼지입력의 조합에 의한 20개의 영역을 계산할 필요가 없어 수행시간이 단축되는 장점이 있다. 제안된 퍼지 디지털 PI+D 제어기는 디지털 PI 및 D 제어 알고리즘에 대해 각각 4개의 간단한 퍼지 If-Then 규칙이 적용된다.

제안된 퍼지 디지털 PI+D 제어기를 선행연구인 Misir 등[11]에서 사용한 예제에 모의 실험하여 효용성을 입증하였다

**II. 디지털 PI+D 제어기와 퍼지 입출력변수의 결정[11]**

디지털 PI+D 제어기는 그림 1의 아날로그 PI+D 제어기의 구조에서 유도된다. 2.1절에서 디지털 PI 제어 알고리즘을 유도한 후, 퍼지 PI 제어 알고리즘의 입출력변수를 결정한다. 2.2절에서는 같은 방법으로 디지털 D 제어 알고리즘을 유도하고 퍼지 D 제어 알고리즘의 입출력변수를 결정한다.

**1. 퍼지 PI 제어 알고리즘**

그림 1에서 아날로그 PI 제어기의 출력은 (1)로 주어진다.

$$u_{PI}(s) = (K_p^c + \frac{K_i^c}{s})E(s) \tag{1}$$

여기서,  $K_p^c$ 는 비례이득,  $K_i^c$ 는 적분이득,  $E(s)$ 는 오차신호이다.

(1)의 방정식을 쌍일차 변환( $s = \frac{2}{T} \frac{z-1}{z+1}$ , 샘플링 주기  $T > 0$ )하고, 역  $z$  변환하면 (2)와 같다.

$$u_{PI}(nT) - u_{PI}(nT - T) = K_p[e(nT) - e(nT - T)] + K_i T e(nT) \tag{2}$$

여기서,  $K_p = K_p^c - \frac{K_i^c T}{2}$ ,  $K_i = K_i^c$ 이다.

(2)의 양변을  $T$ 로 나누어 (3-5)로 정의하면 (6)과 같고, (3)을 다시 나타내면 (7)과 같다. (6) 및 (7)로 유도된 디지털 PI 제어 알고리즘을 이용하여 퍼지 PI 제어 알고리즘을 구성한다.

$$\Delta u_{PI}(nT) = \frac{u_{PI}(nT) - u_{PI}(nT - T)}{T} \tag{3}$$

$$e_p(nT) = \frac{e(nT) - e(nT - T)}{T} \tag{4}$$

$$e_b(nT) = e(nT) \tag{5}$$

$$\Delta u_{PI}(nT) = K_p e_p(nT) + K_i e_b(nT) \tag{6}$$

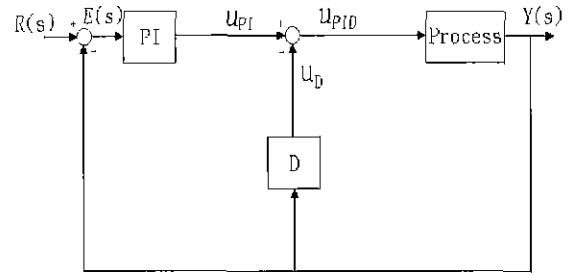


그림 1. 아날로그 퍼지 PI+D 제어시스템.  
Fig. 1. Analog fuzzy PI+D control system.

$$u_{PI}(nT) = u_{PI}(nT - T) + T \Delta u_{PI}(nT) \tag{7}$$

(6)에서 우변의 2개 항  $K_p e_p$ 와  $K_i e_b$ 는 퍼지 PI 제어 알고리즘의 입력변수로 사용된다. 또한 (7)에서  $T \Delta u_{PI}(nT)$ 를 퍼지 PI 제어 알고리즘의 출력  $K_{u_{PI}} \Delta u_{PI}(nT)$ 로 정의하고 다시 쓰면 (8)과 같으며,  $K_{u_{PI}}$ 는 퍼지 PI 제어이득으로 출력 조절계수(output scaling factor)이다.

$$u_{PI}(nT) = u_{PI}(nT - T) + K_{u_{PI}} \Delta u_{PI}(nT) \tag{8}$$

**2. 퍼지 D 제어 알고리즘**

그림 1에서 아날로그 D 제어 알고리즘은 출력만을 미분하여 (9)와 같은 제어입력  $u_D$ 를 계산한다.

$$u_D(s) = s K_d^c Y(s) \tag{9}$$

여기서,  $K_d^c$ 는 아날로그 D 제어 이득,  $Y(s)$ 는 출력신호이다.

(9)를 쌍일차 변환한 후, 역  $z$  변환하면 다음 (10)과 같다

$$u_D(nT) + u_D(nT - T) = \frac{2K_d^c}{T} [y(nT) - y(nT - T)] \tag{10}$$

(10)의 양변을  $T$ 로 나누어 (11-13)으로 정의하면 (14)와 같고, (11)을 다시 쓰면 (15)와 같다. (14)와 (15)이 유도된 디지털 D 제어 알고리즘이다.

$$\Delta u_D(nT) = \frac{u_D(nT) + u_D(nT - T)}{T} \tag{11}$$

$$\Delta y(nT) = \frac{y(nT) - y(nT - T)}{T} \tag{12}$$

$$K_d = \frac{2K_d^c}{T} \tag{13}$$

$$\Delta u_D(nT) = K_d \Delta y(nT) \tag{14}$$

$$u_D(nT) = -u_D(nT - T) + T \Delta u_D(nT) \tag{15}$$

정확한 퍼지규칙을 얻기 위하여 (15)의 우항에  $K_{y_d}(nT)$ 를 더해주면 (16)으로 변형되며, 우변의 2개항  $K_d \Delta y$ 와  $K_{y_d}$ 를 퍼지 D 제어 알고리즘의 입력변수로 사용

한다. 이때, 설계를 간단히 하기 위해서  $K = 1$ 로 놓는다.

$$\Delta u_D(nT) = K_d \Delta y(nT) + K y_d(nT) \quad (16)$$

여기서,

$$y_d(nT) = y(nT) - r(nT) = -e(nT) \quad (17)$$

(15)에서  $T\Delta u_D(nT)$ 를 퍼지 D 제어 알고리즘의 출력  $K_{u_D}\Delta u_D(nT)$ 로 하면 (18)과 같으며,  $K_{u_D}$ 는 퍼지 D 제어이득으로 출력 조절계수이다.

$$u_D(nT) = -u_D(nT - T) + K_{u_D}\Delta u_D(nT) \quad (18)$$

### 3. Combination of the fuzzy digital PI + D control law

전체 퍼지 디지털 PI+D 제어 알고리즘은 퍼지 PI 제어 알고리즘과 퍼지 D 제어 알고리즘의 대수적인 합으로 구해지며, 다음의 (19) 또는 (20)과 같다.

$$u_{PID}(nT) = u_{PI}(nT) - u_D(nT) \quad (19)$$

$$u_{PID}(nT) = u_{PI}(nT - T) + K_{u_{PI}}\Delta u_{PI}(nT) + u_D(nT - T) - K_{u_D}\Delta u_D(nT) \quad (20)$$

구성된 퍼지 디지털 PI+D 제어시스템은 그림 2와 같다.

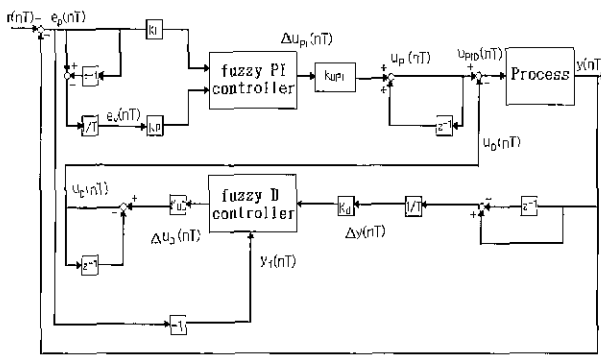


그림 2 퍼지 디지털 PI+D 제어 시스템.  
Fig. 2. Fuzzy digital PI+D control system.

### III. 간접 간접추론방식에 의한 퍼지 디지털 PI+D 제어기

간접 간접추론방식은 Tsukamoto[18]에 의해 제안된 간접추론방식(Indirect Inference Method)을 제어에 보다 용이하게 적용하기 위하여 Sugeno[19]에 의해 제안되었다. 본 논문에서는 Otsubo 등[14]이 사용한 SHM 방법을 PI 알고리즘과 D 알고리즘에 대해 각각 적용한다.

#### 1. 퍼지화(Fuzzification)

(6)의 PI 제어 알고리즘과 (16)의 D 제어 알고리즘에서 입력변수에 대한 소속함수(membership function)는 Ying[8]이 사용한 그림 3과 같은 두 개의 단조증가(monotone increasing) 선형함수의 (21)로 정의된다. 입력변수의 소속정도  $\omega_i$ 는 (22)에서 결정되는데, 소속정도는 0과 1사이의 값으로 함수 PA에서 입력변수가 설계변수 L

보다 크면 1로, -L보다 작으면 0으로 한다. 또한 함수 NA의 경우에는 입력변수가 L보다 크면 0으로, -L보다 작으면 1로 한다. 여기서, L은 설계변수(design variables)로 4장에서 자세히 고찰한다.

$$PA(x_i) = \frac{x_i + L}{2L}, \quad NA(x_i) = \frac{-x_i + L}{2L} \quad (21)$$

$$\omega_{i1} = PA(x_i), \quad \omega_{i2} = NA(x_i) \quad (22)$$

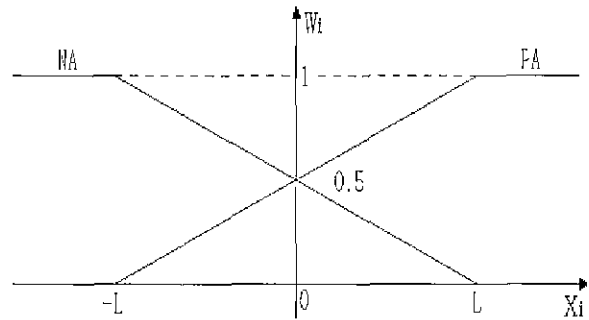


그림 3. 입력 소속 함수.  
Fig. 3. Input membership function.

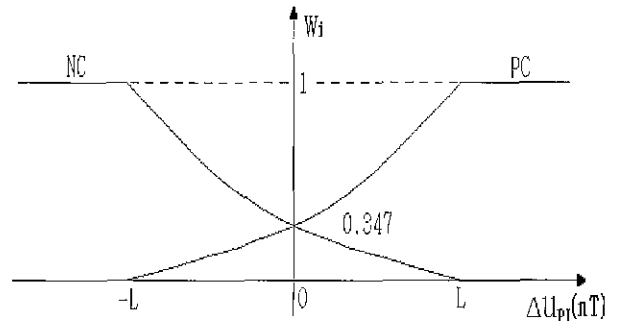


그림 4. 출력 소속 함수.  
Fig. 4. Output membership function

여기서,  $x_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ )는 입력변수로 PI 알고리즘에서는  $K_i e_p$ 과  $K_p e_e$ 이고, D 알고리즘에서는  $K y_d$ 과  $K_d \Delta y$ 이다.

#### 2. 퍼지제어규칙(fuzzy control rules)

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

- R1) IF  $K_i e_p$  is PA. Then  $\Delta u_{11}$  is  $PC^{-1}$ .
- R2) IF  $K_i e_p$  is NA. Then  $\Delta u_{12}$  is  $NC^{-1}$ .
- R3) IF  $K_p e_e$  is PA. Then  $\Delta u_{21}$  is  $PC^{-1}$ .
- R4) IF  $K_p e_e$  is NA. Then  $\Delta u_{22}$  is  $NC^{-1}$ .
- R5) IF  $K y_d$  is PA. Then  $\Delta u_{31}$  is  $PC^{-1}$ .
- R6) IF  $K y_d$  is NA. Then  $\Delta u_{32}$  is  $NC^{-1}$ .
- R7) IF  $K_d \Delta y$  is PA. Then  $\Delta u_{41}$  is  $PC^{-1}$ .

R8) IF  $K_d \Delta y$  is NA, Then  $\Delta u_{i2}$  is  $NC^{-1}$ .

출력변수에 관한 소속함수는 간단한 선형함수나  $\arctan$  함수도 가능하나, Misir 등[11]의 제어입력의 공간과 유사한 공간을 형성할 수 있도록 그림 4의 비선형 함수의 (23)을 사용한다. (23)의 비선형 함수는 단조증가이고 (24)의 역함수(inverse function)가 존재하므로 적용 가능하다.

$$PC = [4.5 - \sqrt{21.25 - (x_i/L + 2)^2}] \quad (23)$$

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

$$PC^{-1} = L \times [-2 + \sqrt{21.25 - (\omega_i - 4.5)^2}] \quad (24)$$

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

간편 간접추론방식(SIIM)을 적용할 때, 각 입력변수  $x_i$ 에 관한 입력의 증분  $\Delta u_i$ 는 2개로, 2개의 소속정도  $\omega_{i1}$ 과  $\omega_{i2}$ 의 함수 (25)에서 결정된다.

$$\Delta u_{i1} = PC^{-1}(\omega_{i1}), \Delta u_{i2} = NC^{-1}(\omega_{i2}) \quad (25)$$

3. 비퍼지화(Defuzzification)

(25)에 의해 구해진 퍼지제어 입력의 크기에서 가중치 결합(weighted combination)의 (26)을 사용하여 각 퍼지입력  $x_i$ 의 증분  $\Delta u_i$ 가 결정된다

$$\Delta u_i = \frac{w_{i1}\Delta u_{i1} + w_{i2}\Delta u_{i2}}{w_{i1} + w_{i2}} \quad (26)$$

PI 제어입력의 증분  $\Delta u_{PI}$ 는 (27)과 같으며, 퍼지 D 제어입력의 증분  $\Delta u_D$ 는 (28)와 같다.

$$\Delta u_{PI} = 1/2(\Delta u_1 + \Delta u_2) \quad (27)$$

$$\Delta u_D = 1/2(\Delta u_3 - \Delta u_4) \quad (28)$$

위의 식들에서 각 퍼지알고리즘에 의한 증분들은 2개의 입력변수에서 구해지므로 2로 나누어지고, 3개의 입력변수에서 구해지면 3으로 나눈다[13].

그림 3의 입력변수에 관한 선형 소속함수와 그림 4의 출력변수에 관한 비선형 소속함수에 간편 간접추론방식을 사용하여 유도된 정규화된 퍼지 PI 제어입력의 증분  $\Delta u_{PI}$ 에 대한 정규화 입력공간은 그림 5와 같다. 퍼지 D 제어입력의 증분  $\Delta u_D$ 에 대한 정규화 공간은 그림 6과 같다. 그림 5 및 그림 6은 Misir 등[11]에 의해 유도된 20개로 분할된 입력공간과 유사하다.

(27)과 (28)을 사용한 전체 퍼지 디지털 PI+D 제어 알고리즘은 그림 1의 구조에 의해 (29)로 정의된다.

$$\Delta u_{PID} = \Delta u_{PI} - \Delta u_D \quad (29)$$

IV. 모의실험 및 고찰

제안된 퍼지 디지털 PI+D 제어기의 성능을 고찰하기 위하여, Misir 등[11]이 사용한 플랜트에 모의실험하였다. 제

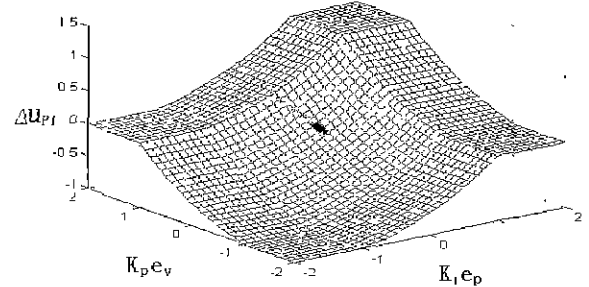


그림 5. 정규화된  $\Delta u_{PI}$  제어 입력 공간.

Fig. 5 Normalized  $\Delta u_{PI}$  control input space.

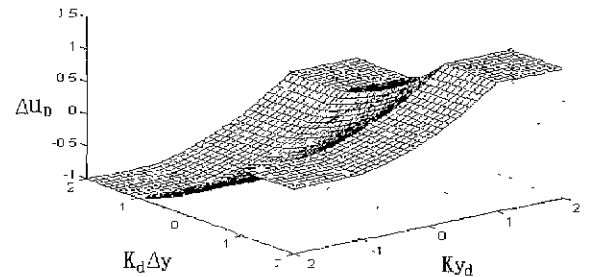


그림 6. 정규화된  $\Delta u_D$  제어 입력 공간.

Fig. 6. Normalized  $\Delta u_D$  control input space.

안된 퍼지 디지털 PI+D 제어기의 모든 매개변수는 Misir 등이 제안한 값을 그대로 사용하였으나, 제어성능이 좋지 못한 경우 시행착오적으로 구한 값을 사용한다. 모든 플랜트에 대해 샘플링 시간 T=0.1을 적용하였다.

1. 선형 플랜트

첫 번째 선형 플랜트는 (30)의 안정적인 1차 플랜트이다.

$$H(s) = \frac{1}{s+1} \quad (30)$$

위의 플랜트에 대해 Misir 등이 사용한 매개변수와 동일한 매개변수를 사용하였을 때의 계단응답은 그림 7과 같다. 설계변수는  $L=360$ 이고, 입력 조절계수는  $K_p=1.2$ ,  $K_d=0.1$ ,  $K_i=1.0$ 이며, 출력 조절계수는  $K_{u_n}=0.2$ ,  $K_{m_n}=0.01$ 이다 그림 7에서 두 방법 모두 오우버 슈트가 없는 안정된 출력을 나타낼을 알 수 있다.

선형플랜트의 두 번째 예는 (31)의 2차 플랜트이다.

$$H(s) = \frac{2}{s^2 + 4s + 3} \quad (31)$$

위 플랜트에 대해 Misir 등이 사용한 동일한 매개변수를 사용하였으며, 이때의 계단응답은 그림 8과 같다. 그림 8에서 두 방법 모두 오우버 슈트가 없는 안정된 출력을 나타낼을 알 수 있다.

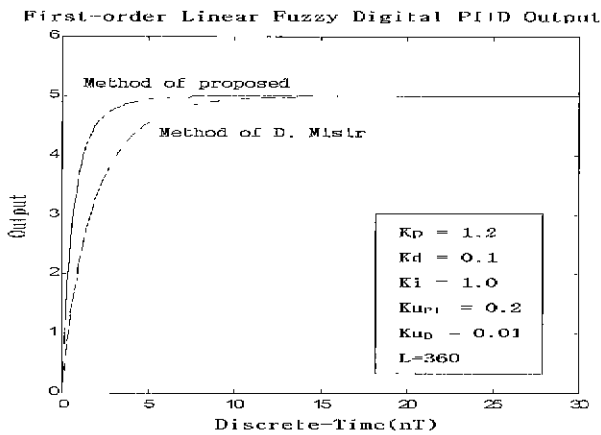


그림 7. 1차 플랜트에 대한 계단 응답.

Fig. 7. Step response for 1st-order plant.

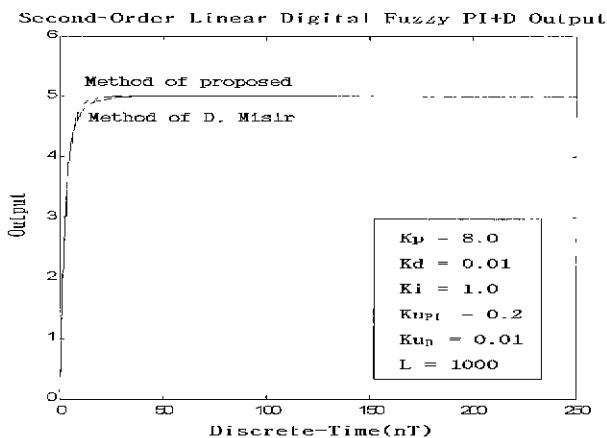


그림 8. 2차 플랜트에 대한 계단 응답.

Fig. 8. Step response for 2nd-order plant.

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 퍼지 디지털 PI+D 제어기의 성능을 고찰하기 위하여 선정된 첫 번째 비선형 플랜트는

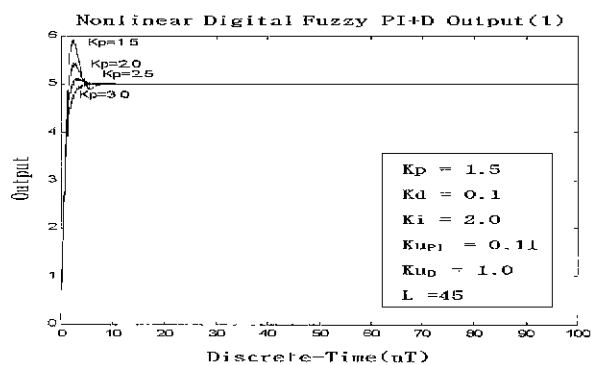


그림 9.  $K_p$  값의 변화에 따른 출력 비교.

Fig. 9. Comparison of output with varying  $K_p$ .

(32)와 같다

$$\dot{y} = 0.0001|y(t)| + u_{PID}(t) \quad (32)$$

Misir 등과 동일한 매개변수를 사용하여 입력 조절계수  $K_p, K_i, K_d$ 의 변화에 따른 계단응답을 고찰하였다. 그림 9는  $K_p$ 를 변화시킨 경우의 계단응답을 도시한 것으로,  $K_p$ 의 값이 작아질수록 오우버 슈트가 증가하고, 상승시간 길어지는 것을 알 수 있다. 그림 10은  $K_i$ 의 변화에 따른 계단응답으로  $K_i$ 값이 감소할수록 오우버 슈트가 감소하고 응답속도는 늦어짐을 알 수 있다. 또한, 그림 11은  $K_d$ 의 변화에 따른 계단응답으로,  $K_d$  값이 증가하면 오우버 슈트가 감소하고 상승시간도 빨라짐을 알 수 있다.

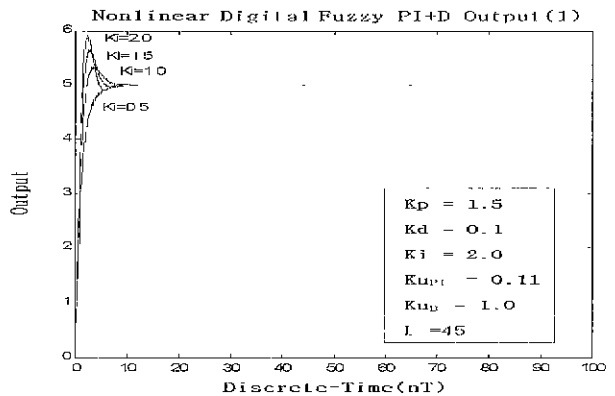


그림 10.  $K_i$  값의 변화에 따른 출력 비교.

Fig. 10. Comparison of output with varying  $K_i$ .

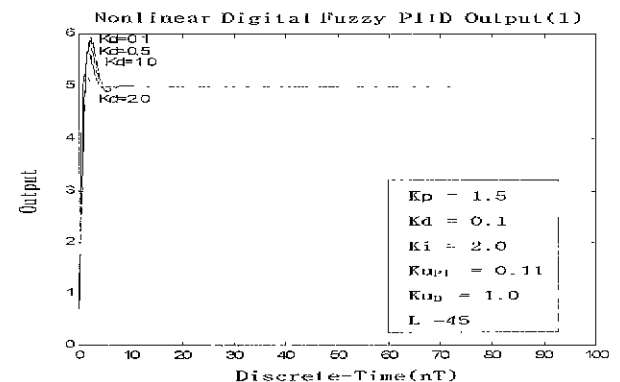


그림 11.  $K_d$  값의 변화에 따른 출력 비교

Fig. 11. Comparison of output with varying  $K_d$ .

각 매개변수변화에 따른 응답특성을 적절히 고려하여 선정된 매개변수와 선정된 매개변수에 의한 계단응답을 그림 12에 나타내었다 그림 12에서 두 방법 모두 오우버 슈트가 없는 안정된 출력을 나타냄을 알 수 있다.

그림 13은 설계변수  $L$ 값의 변화에 따른 계단응답으로,

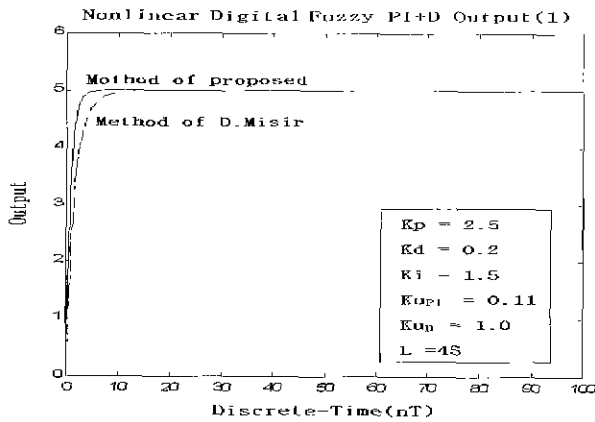


그림 12. 비선형 플랜트(1)에 대한 계단 응답.  
Fig. 12. Step response for nonlinear plant(1).

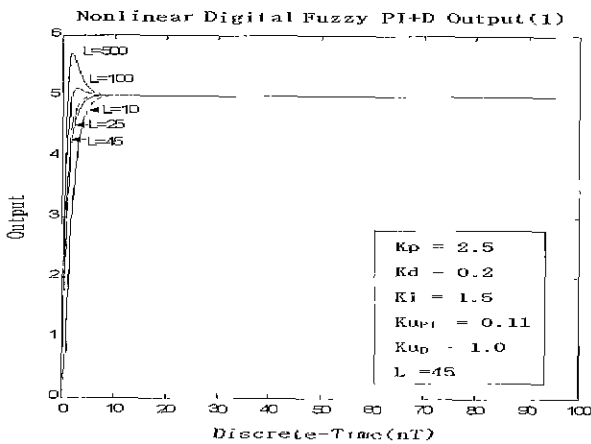


그림 13. L 값의 변화에 따른 출력 비교.  
Fig. 13. Comparison of output with varying L

퍼지화 과정에서 최대값으로 포화(saturation)된 제어 입력의 증분이 계속적으로 발생되므로 불안정해지고, 적절히

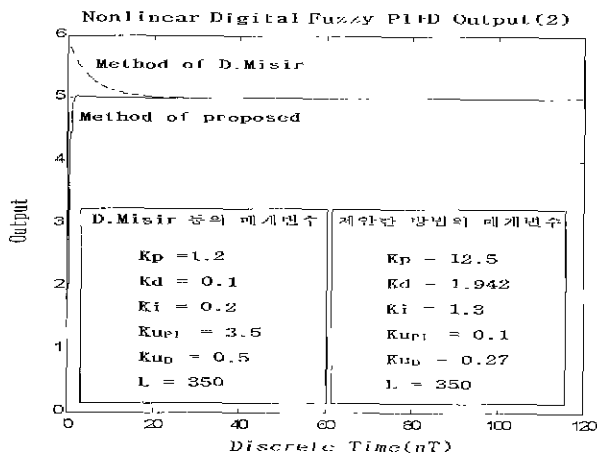


그림 14. 비선형 플랜트(2)에 대한 계단 응답  
Fig. 14. Step Response for nonlinear plant(2)

동조된 값보다 작아지면, 제어입력의 증분이 작게되어 상승시간이 길어지는 것을 알 수 있다.

비선형 플랜트의 두 번째 예는 (33)과 같다

$$y'(t) = y(t) + \sqrt{y(t)} + u_{PID}(t) \quad (33)$$

응답특성을 적절히 고려하여 선정된 매개변수는 Misir 등의 매개변수와의 상이하다. 제안된 방법과 D. Misir 등의 방법에 의한 계단응답을 그림 14에 도시하였다. 그림 14에서 두 방법 모두 안정된 출력을 보이고 있으나, 제안된 방법이 오우버 슈트가 없는 더 빠른 응답속도를 가지는 우수한 제어성능을 보인다

이상의 모의실험 결과를 종합하면, 선형 플랜트와 비선형 플랜트에 대해 제안된 퍼지 디지털 PI+D 제어기에 의한 방법이 Misir 등의 제어기에 비해 오우버 슈트가 없고, 더 빠른 응답속도를 나타내고 있음을 알 수 있다.

### V. 결론

본 논문에서는 간편 간접추론방법을 사용하는 퍼지 디지털 PI+D 제어기를 설계하였다. 제안된 퍼지 제어기는 PID 제어기의 PI+D 구조를 사용하였고, 디지털 PI 제어 알고리즘과 퍼지 디지털 D 제어 알고리즘에 대해 각각 4개의 간단한 퍼지 If-Then 규칙으로 구성된다. 또한, 간편 간접추론방법을 사용하므로 Misir 등[11]과 같이 퍼지입력의 조합에 의한 20개의 영역을 계산할 필요가 없어 수행시간이 단축되는 장점이 있다. 간단한 단조증가 선형 퍼지화와 단조증가 비선형 비퍼지화를 적용한 후 가중치 결합으로 제어입력을 생성하였다.

구성된 제어기는 다음과 같은 장점을 가진다. 첫째, 종래의 선형 디지털 PI+D 제어기를 기초로 퍼지 디지털 PI+D 제어기를 설계하므로 가속도 오차를 사용하지 않는 장점이 있다. 둘째, 퍼지 제어기의 제어입력이 비선형 함수의 비퍼지화로 결정되므로 비선형 플랜트에 우수한 적응능력을 가진다. 셋째, 간편 간접추론방식을 사용하여 퍼지입력 변수 별로 추론하므로 고속 추론이 가능하고, 입력변수의 증가에 따른 퍼지규칙의 수가 증가하여도 쉽게 적용 가능하다. 넷째, 제안된 퍼지 디지털 PI+D 제어기의 성능은 선형 및 비선형 플랜트에 대해 Misir 등이 제안한 퍼지 제어기보다 우수한 성능을 보인다.

추후 연구과제는 제안된 퍼지 디지털 제어기의 다양한 모의실험, 제어기의 성능을 향상시키기 위한 매개변수 최적 선정에 관한 고찰 및 BIBO 안정도에 관한 연구 등이다.

### 참고문헌

[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, 장적환, "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. Feigenpan, 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 non-linear 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," *Proc. of IJCNN '98 & FUZZ-IEEE '98 ICEC '98*, pp. 551-554, May. 4-9, 1998.
- [18] Y. Tsukamoto, "Fuzzy inference," *J. of Society of Instrument and Control Engineers*, vol. 22-1, pp. 139-145, 1983.
- [19] M. Sugeno, "Fuzzy control," Nikkan Kogyo Pub, Tokyo, 1988.
- [20] 고종선, 이정훈, 윤명중, "회지 로직을 이용한 브러쉬 없는 직류 전동기의 파라메타의 변화와 외란에 둔감한 위치제어," *대한전기학회*, vol. 40, no.10, pp. 1037-1048.
- [21] K. J. Astrom, and B. Wittenmark, "Computer controlled systems theory and design," Prentice-Hall, 1984.



#### 채 창 현

1980년 연세대 전기과 졸업. 동대학원 석사(1982), 동대학원 박사(1989). 1988년~현재 국립금오공과대학교 전자공학부 교수. 관심분야는 적응제어, 퍼지제어, 신경망제어, 비선형제어.