

## 수정 윈도우잉 기법을 이용한 외란부가 서보 시스템의 퍼지 제어

正會員 李 五 杰\* 正會員 盧 鍾 和\* 正會員 李 浚 柝\* 正會員 禹 靖 仁\*

### Fuzzy Control of Disturbance-added Servo System Using Modified Windowing Technique

Oh Geol Lee\*, Jong Hwa Noh\*, Joon Tak Lee\*, Jeong In Woo\* *Regular Members*

#### 요 약

본 논문에서는 수정 윈도우잉 기법을 이용한 외란부가 서보 시스템의 퍼지제어를 제안하고 있다. 종래의 윈도우잉 기법은 스케일 팩터를 오차에 대해 계단상으로 조정하기 때문에 미소한 외란에 대해서도 시스템의 불안정 현상을 유발한다. 그러나, 제안한 수정 윈도우잉 기법은 지수함수형으로 조정하는 것이다.

따라서, 이 기법을 적용한 서보 시스템은 내·외부 외란에 대한 우수한 적응특성을 나타내었으며, 정상 상태의 편차도 현저히 경감시키게 되었다.

#### ABSTRACT

In this paper, a Fuzzy control approach of disturbance added servo system using MWT(modified windowing technique) was proposed. Because conventional windowing techniques adjust stepwisely a series of scale factors, even small disturbances make system unstable.

But the proposed MWT adjusts exponentially. Therefore a servo system which applied this technique had coped excellently with internal and external disturbances, and also had decreased substantially steady-state deviation.

#### I. 서 론

과학의 발달과 더불어 인간이 행하던 제어를 마이크로프로세서등의 자동화 설비로 행하고 있다. 따라

서, 여러 가지 복잡한 시스템이 등장하고 있으며, 현재까지의 일반적인 제어는 PID제어나, 최적제어 등을 이용하고 있지만, 주위 환경과 외란에 대한 강인성 및 시스템의 비선형성 때문에 많은 계산 시간이 요구되는 최적제어, 적응제어 등 복잡한 이론이 부가되어야 하는 문제점을 안고 있다.

따라서, 이러한 문제점을 해결하기 위해서 1965년

\*東亞大學校 電氣工學科  
Dept. of Electrical Engineering, Dong-A University  
論文番號: 92-145(接受1992. 8. 12)

Zadeh 교수가 제안한 퍼지집합의 개념과 1973년 Zadeh가 복잡한 시스템의 해석과 제어에 퍼지 집합의 이용 가능성을 제안한 이후, 선형 특성인 시스템은 물론 비선형성 특성 또는 시스템의 정확한 동특성의 기술이 어려운 시스템에 대해서도 적용 가능하였다.<sup>1)</sup>

퍼지제어를 할 경우 PID 등의 고전적 제어기에 비해 비선형 시스템에서 유연한 제어성능을 발휘하고 있으나, 최적 Rule의 선정 및 제어 측정변수의 양자화 레벨선정 등에 있어 많은 문제점이 지적되고 있다.<sup>2)</sup>

특히, 속응성과 정확성이 요구되는 서보 시스템을 PID제어하는 경우 정상편차는 적지만 내·외부 외란에 대한 과도응답이 악화되는 문제점이 있다. 또한, 퍼지제어는 부하변동에 대해 과도특성은 양호하지만 정상편차가 존재하는 결점이 있다. 최근 이와 같은 결점을 상호보완하기 위해 PD제어와 퍼지제어를 결합한 Hybrid제어가 제안되고 있으나 실현을 위한 설계가 복잡해지고 실시간 제어가 곤란해진다.<sup>3), 4)</sup> 더욱이, 퍼지제어의 경우 오버슈트나 정상상태의 오차를 감소시키는데는 한계가 있기 때문에 어느 값 이하의 제어가 불가능하게 된다. 이를 보상하기 위한 기법의 하나로 원도잉 기법을 사용하므로써 보다 정밀한 제어가 가능하지만 스케일 팩터를 계단狀으로 확장시키기 때문에 유연한 제어가 되지 못하고 스케일 팩터를 과도하게 확장할 때 미소한 외란에도 불안정하게 되는 결점이 있다.

따라서, 본 논문에서는 내·외부 외란이 부가될 때 과도응답이 악화되고 정상상태의 잔류편차가 증가되는 등의 문제점을 해결하기 위해서 스케일 팩터를 오차에 대한 지수함수로 표현하여 연속적으로 조정할 수 있는 수정 원도잉 기법을 제안한다. 또한, 시뮬레이션을 통하여 이 알고리즘이 내·외부 외란시의 과도특성 개선 뿐만아니라 정상특성에 있어서도 우수함을 입증하고자 한다.

## II. 퍼지 제어 알고리즘

퍼지제어 시스템의 일반적인 구성은 그림1과 같이 사실과 결론을 If-Then 형식으로 서술하는 퍼지제어 Rule부와 퍼지 입력으로부터 명확한 아나로그 출력을 연산하는 퍼지 추론부, 퍼제어 프로세서부로 크게 나눌 수 있다.

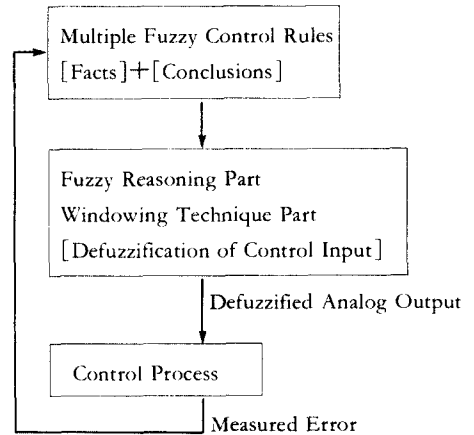


그림 1. 퍼지제어 알고리즘의 블록도  
Fig.1. Block Diagram of Fuzzy Control Algorithm

퍼지 추론이란, 몇가지의 퍼지 명제들로부터 어느 한 명제를 도출해내는 것으로 퍼지관계의 합성규칙에 의한 직접법과 퍼지 진리치를 이용하는 간접법이 있으며, 본 논문에서는 직접법에 의해 비퍼지한 대표점  $y_0$ 를 중력 중심법에 의해 구하는 과정을 이용하였다. 퍼지 집합 A의 특성을 나타내는 멤버쉽 함수  $\mu_A$ 는 전체집합 E인 단위 폐구간  $[0, 1]$ 내의 값에 의해

$$\mu_A : E \Rightarrow [0, 1] \quad (1)$$

로 표현된다.

그런데, 전체집합 E가 多值인 유한집합  $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 인 경우, 퍼지 집합 A는

$$A = \sum_{i=1}^n \mu_A(X_i) / X_i \quad (2)$$

로 되고, E가 무한집합인 경우

$$A = \int_E \mu_A(X) / X \quad (3)$$

로 표현된다.

퍼지추론에 있어서 중간정도의 애매한 평가를 적극적으로 이용한 대부분의 산업응용 시스템은 Rule형 전향 추론법에 근거하고 있다. 본 논문에서는 Rule형 전향 퍼지 추론법을 채용한다. 이는

If-Then형식의 Rule로 표현되는데, If 뒤에는 전제 조건 또는 전건부인 사실과 Then 뒤에는 후건부 또는 조작부인 결론으로 구성된다. 이와 같은 사실과 결론에서 정식화한 퍼지 명제의 예는 식(4)와 같이 표현된다.

|   |  |
|---|--|
| i th Rule : If X1 is A <sub>i</sub> and X2 is B <sub>i</sub> then y is C <sub>i</sub> | A <sub>i</sub> × B <sub>i</sub> → C <sub>i</sub> |
| 전 제 : X1 is A' and X2 is B'   | A' × B'  |
| 결 론 : y is C'   | C'   |

(4)

단, A<sub>i</sub>, A', B<sub>i</sub>, B', C<sub>i</sub>, C'는 전체집합 E의 論議 領域(Universe of discourse) X, X', Y, Y'의 부분집합으로 퍼지 집합개념에 따른다.

Mamdani의 방법에 따른 퍼지 추론의 결론 C'는 다음과 같이 구해진다.

$$C' = (A' \text{ and } B') \circ (A_1 \text{ and } B_1 \rightarrow C_1) \cup (A_2 \text{ and } B_2 \rightarrow C_2) \cup \dots \cup (A_n \text{ and } B_n \rightarrow C_n) = (A' \text{ and } B') \circ R_1 \cup R_2 \cup \dots \cup R_n = [A' \circ (A_1 \rightarrow C_1) \cap B' \circ (B_1 \rightarrow C_1)] \cup \dots \cup [A' \circ (A_n \rightarrow C_n) \cap B' \circ (B_n \rightarrow C_n)] \quad (5)$$

$$\mu_{A_i \times B_i}(X_1, X_2) = \mu_{A_i}(X_1) \wedge \mu_{B_i}(X_2) \quad (6)$$

식(6)에서 기호  $\wedge$ 는 t norm을 나타낸다.<sup>5)</sup> 그러므로

$$\begin{aligned} \mu_{C_i}(y) &= \max_{X_1} \max_{X_2} [\mu_{A_i}(X_1) \wedge \mu_{B_i}(X_2) \wedge \mu_{C_i}(y)] \\ &\quad \wedge \mu_{A'}(X_1) \wedge \mu_{B'}(X_2) \\ &= \max_{X_1} [\mu_{A_i}(X_1) \wedge \mu_{A'}(X_1)] \wedge \max_{X_2} [\mu_{B_i}(X_2) \wedge \mu_{B'}(X_2)] \wedge \mu_{C_i}(y) \end{aligned} \quad (7)$$

로 되고 A<sub>i</sub>, B<sub>i</sub>, C<sub>i</sub>(i=1, 2, ..., n)는 퍼지 집합으로 각각의 멤버십 함수  $\mu_{A_i}(X_1)$ ,  $\mu_{B_i}(X_2)$ ,  $\mu_{C_i}(y)$ 를 갖는다.

이 때 X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>의 非 퍼지값 X<sub>10</sub>, X<sub>20</sub>가 주어지면 y의 합성치는 Braae와 Rutherford의 중심법에 의해 y의 추론치 y<sub>0</sub>는 다음과 같이 구할 수 있다.<sup>5)</sup>

$$y_0 = \frac{\sum_{i=1}^n [\mu_{A_i}(X_{10}) \wedge \mu_{B_i}(X_{20})] \cdot \bar{y}_i}{\sum_{i=1}^n [\mu_{A_i}(X_{10}) \wedge \mu_{B_i}(X_{20})]} \quad (8)$$

여기서  $\bar{y}_i$ (i=1, 2, ..., n)는 멤버십 함수  $\mu_{C_i}(y)$ (i=1, 2, ..., n)가 최대치를 취할 때의 값이다.

### III. 수정 원도잉 기법

퍼지제어는 미지의 프로세스나 복잡한 시스템의 수학적 모델링이 불가능한 경우에도 앞장에서 논의된 퍼지추론에 의해 적절한 제어량을 얻을 수 있지만, 정상 편차 즉, 목표점의 주위에서 약간의 오차를 항상 가지고 진동이 발생한다는 문제점이 있다.

일반적으로 퍼지제어기의 精度는 적분동작으로 진동을 제거하더라도 PID제어보다는 좋지 못하다. 따라서, 목표점과의 차이가 클 경우 퍼지제어기가 유리한 반면 목표점에 가까운 경우는 PID제어기가 유리하다. 서보 시스템을 구동할 때 과도상태의 특성을 개선시키고 정상상태의 잔류편차를 감소시키기 위한 방법의 하나로 퍼지제어에 원도잉 기법이 적용되고 있으며, 일반적인 원도잉 기법의 원리를 나타내면 그림2와 같다.<sup>6)</sup>

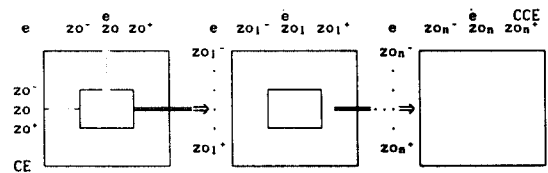


그림 2. 원도잉 기법  
Fig.2. Windowing Technique

여기서, 오차와 오차 변화율 및 제어량 U에 대한 크기를 조절하는 스케일 팩터를 각각 CE, CCE, CU로 나타낸다.

원도잉 기법은 그림2에서와 같이 오차가 미리 정해진 영역에 들어올 때부터 오차 e와 오차의 변화율 e의 스케일을 확장한 후 다시 제어 Rule을 형성하여 제어하는 것이다. 이때 오차의 값에 대해 계단狀으로 스케일을 확장하기 때문에 유연한 제어가 되지 못하며, 오차가 아주 작을 때 너무 지나치게 스케일 팩터를 확장시키면 미소한 외란에 대해서도 오히려 시스템이 불안정하게 되는 문제점을 갖고 있다.

따라서, 본 논문에서는 오차의 크기에 따라 스케일 팩터의 값이 연속적으로 변화되 목표점과 차가 클 때는 스케일 팩터의 변화를 급속하게 하여 시스템의 응답이 빠르게 하고, 목표점 부근에서는 완만하게 변

화하도록 하여 너무 민감하지 않도록 하기 위해서 아래와 같은 지수함수 형태의 새로운 식을 제안한다.

$$CE = \alpha e^{-(DCE * e)} \quad (9)$$

$$CCE = \beta e^{-(DCCE * e)} \quad (10)$$

$$CU = \gamma e^{-(DCU * e)} \leq CU_{max} \quad (11)$$

여기서  $\alpha, \beta, \gamma$ 는 오차가 Zero일 때 각 스케일 팩터의 값이며, DCE, DCCE, DCU는 각 스케일 팩터의 지수 함수에 대한 기울기 값이다.

$CU_{max}$ 는 정격 입력전압의 제한을 위한 스케일 팩터의 최대값이다.

여기서 스케일 팩터의 조정은 멤버십 함수의 폭을 조정하기 때문에 CE, CCE는 오차가 클수록 작게하여 퍼지 Rule에서 최대의 영역에 많이 속하도록 하고, CU는 이와 반대로 오차가 클수록 제어량을 그만큼 많이 입력시키기 위해서는 비례하여 증가시켜야 한다.

#### IV. 시뮬레이션 결과 및 고찰

시뮬레이션에 사용한 직류 서보 전동기의 수학적 모델은 식(12), (13)과 같으며 사양은 표1과 같다.

$$La \frac{di_a}{dt} + Ri_a + K_b \omega = V \quad (12)$$

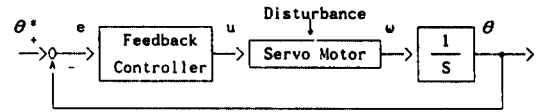
$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} + T_l = K_T i_a \quad (13)$$

Table1. Specification of DC Servo Motor

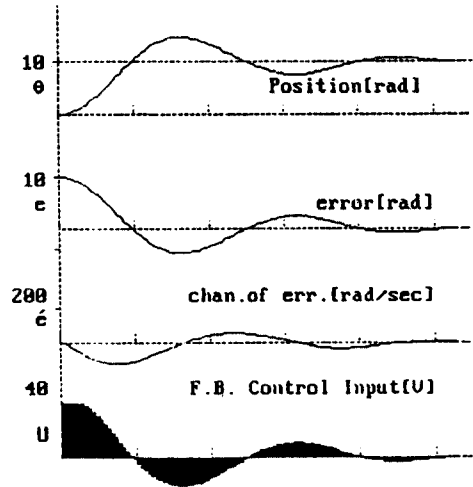
표1. 직류 서보 전동기의 사양

|  |   |
|--|---|
| $R_a = 1.175[\Omega]$                  | $L_a = 0.00145[H]$                      |
| $J = 0.00145[kg \cdot cm \cdot sec^2]$ | $B = J / .05128[kg \cdot cm \cdot sec]$ |
| $K_b = 0.06829[V \cdot s / rad]$       | $K_T = K_i = 0.695[kg \cdot cm / A]$    |
| Rated Voltage $U_r = 40[V]$            | Rated Torque $T_r = 2.35[kg \cdot cm]$  |
| Rated Current $I_r = 2.65[A]$          | Rated Speed $N_r = 3875rpm$             |
| Rated Power $P_r = 80[W]$              |   |

직류 서보 시스템의 피드백 제어시 서보 시스템과 응답은 그림 3과 같다.



(a) 서보 시스템  
(a) Servo System



(b) 동특성 응답  
(b) Dynamic Responses

그림 3. 피드백 제어기의 직류 서보 시스템과 그 응답  
Fig.3. DC Servo System with Feedback Controller and It's Dynamic Responses(100[ms/div])

단,  $\theta^*$  : 각도의 지령치[rad]

$\theta$  : 각도의 측정치[rad]

$e = \theta^* - \theta$  : Error

$\dot{e} = de/dt$  : Change rate of error

이다.

각도의 지령치는 10[rad]으로 하였으며, 서보 전동기의 입력은 40[V]로 제한하였다. 서보 전동기의 특성에 의해 +1.5[V]이하에서 -1.5[V]이상은 불감대의 영역으로서 구동력이 없으므로 0으로 간주하였다.

그림3에서와 같이 피드백 제어시 정정시간이 길어지고 오버슈트도 크게 나타나는 등 많은 문제점이 있으므로 이를 보상하기 위하여 일반적으로 PID제어나, 최적제어, 적응제어 등을 이용하고 있지만, 주위 환경과 외란에 대한 적응성 및 시스템의 비선형성 때문에 많은 계산 시간이 요구되고 시스템이 복잡해진

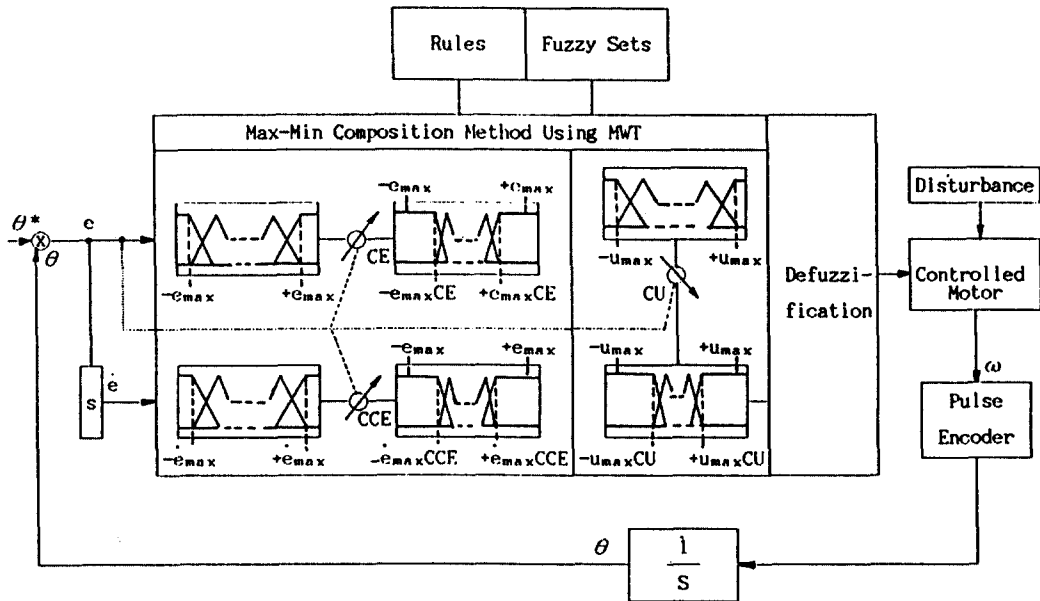


그림 4. 퍼지 제어를 부가한 직류 서보계의 블록선도  
 Fig.4. Blockdiagram of DC Servo System with Fuzzy Controller

다. 따라서, 시스템이 간단하면서도 실 제어에 우수한 성능을 발휘하는 퍼지제어를 적용하고자 한다.

수정 원도잉 기법을 부가한 직류 서보 시스템의 퍼지 제어 블록선도는 그림4와 같다.

목표값  $\theta^*$ 와 회전각  $\theta$ 의 차에서 오차  $e$ 를 구하고, 한주기 마다 오차의 변화량  $\dot{e}$ 를 구한 다음 식(9)와 식(10)을 이용하여 위 블록에서와 같이 오차에 대해 오차와 오차의 변화율의 멤버십 함수의 폭을 조정하고, 식(11)을 이용하여 제어량의 멤버십 함수 폭을 조정한다.

그리고, 식(4)와 같이 전향 추론에 의해서 퍼지화한 제어량  $U$ 는 식(8)의 중력중심법에 의해 비퍼지한량을 계산하므로서 적절한 제어량이 산출된다.

퍼지 제어를 설계하기 위해 그림3과 같은 직류 서보 시스템의 Feedback제어시 오차와 오차의 변화율에 대한 위상면 궤적인 그림5를 근거로 하여 발생된 퍼지제어 Rule을 작성하면 표2와 같다.<sup>7, 8)</sup>

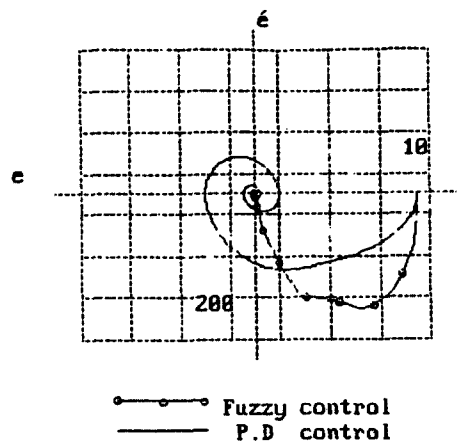


그림 5.  $e$ 와  $\dot{e}$  에 대한 위상면 궤적  
 Fig.5. Phase plane trajectory on  $e$  and  $\dot{e}$

Table 2. Adjustments of Fuzzy Rule using Phase Plane Trajectory

표2. 위상면을 이용한 퍼지규칙 조정

(a)Initial Fuzzy rule

(a)초기 퍼지 규칙

| $\dot{e}$ \ $e$ | c | NB | NM | NS | ZO | PS | PM | PB |
|-----------------|---|----|----|----|----|----|----|----|
|                 | u |    |    |    |    |    |    |    |
| PB              |   |    |    |    |    |    |    |    |
| PM              |   |    |    |    |    |    |    |    |
| PS              |   |    |    |    | NS |    |    |    |
| ZO              |   |    |    | NS | ZO | PS |    | PB |
| NS              |   |    |    |    |    |    |    |    |
| NM              |   |    |    |    | PS |    |    |    |
| NB              |   |    |    |    |    | PM |    |    |

(b)Modified Fuzzy rule

(b)개선된 퍼지 제어 규칙

| $\dot{e}$ \ $e$ | c | NB | NM | NS | ZO | PS | PM | PB |
|-----------------|---|----|----|----|----|----|----|----|
|                 | u |    |    |    |    |    |    |    |
| PB              |   |    |    |    |    |    |    |    |
| PM              |   |    |    |    |    |    |    |    |
| PS              |   |    |    |    |    |    |    |    |
| ZO              |   |    |    | NS | ZO | PS |    | PB |
| NS              |   |    |    |    | ZO |    |    |    |
| NM              |   |    |    |    |    | PS |    |    |
| NB              |   |    |    |    |    |    | PM |    |

그런데, 표2(a)와 같은 퍼지 Rule로 제어할 때 도달시간의 지연 및 오버슈트의 발생, 정상상태 오차 등의 문제점이 있으므로 이를 보상하기 위하여 Rule을 다음과 같이 수정하였다.

즉, 목표점에 도달시간을 단축시키기 위해  $e=ZO$ 이고,  $\dot{e}=NM$ 일 때  $u=PS$ 를  $e=PS$ 이고,  $\dot{e}=NM$ 일 때  $u=PS$ 로 수정하고,  $e=PS$ 이고  $e=NB$ 일 때  $u=PM$ 을,  $e=PM$ 이고  $\dot{e}=NB$ 일 때  $u=PM$ 으로 수정하였으며, 오버슈트를 개선하기 위하여  $e=ZO$ 이고  $\dot{e}=PS$ 일 때  $u=NS$ 를  $e=ZO$ 이고,  $\dot{e}=NS$ 일 때  $u=ZO$ 로 수정하여 표2(b)와 같이 적절한 퍼지제어 Rule을 구하였다.

식(12)와 식(13)을 기초로한 비례미적분(PID)제어와 이상의 퍼지이론을 이용하여 시뮬레이션한 결과를 그림6과 그림7에 나타내었다.

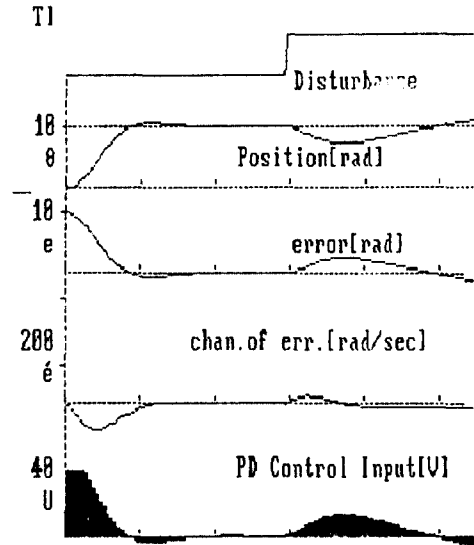


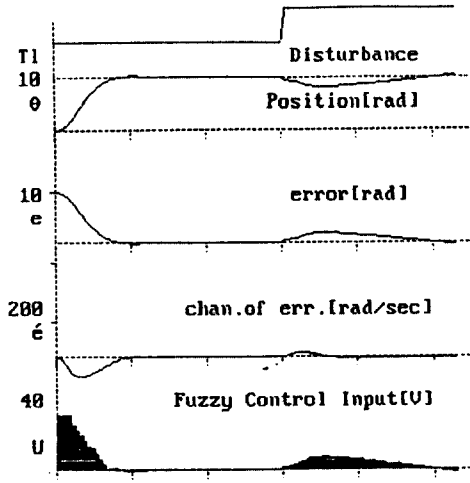
그림 6. PID제어시 동특성 응답(100[ms])

Fig.6. Dynamic Responses at PID control

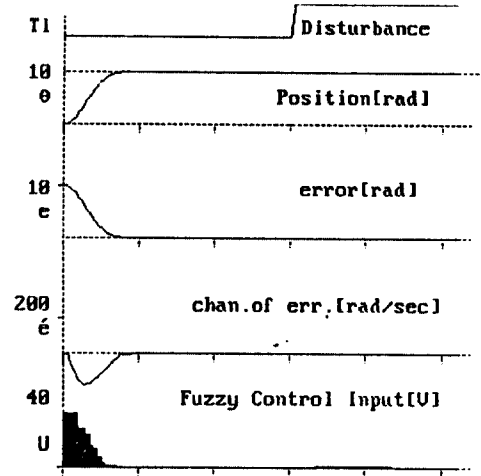
그림6은 직류 서보전동기를 이용한 위치제어에 고전제어 방식인 PID제어를 적용한 결과로서 목표치는 10[rad]으로 하였으며, 외란에 대한 강인성을 평가하기 위해 목표치에 도달하여 정상상태로 된 300[ms] 시점에서 권선 저항값을 1.175[Ω]에서 1.0[Ω]으로 감소시켜 내부 외란을 가하고, 외부외란은 Sin함수인  $T_1 = 1.5 \sin(377t)$ 를 부가하였다. 이때, 외란에 대한 위치변동량이 아주 미소하므로 외란부가 시점부터 스케일을 5배로 확대하여 나타내었다.

그 결과 목표점에 도달시간은 95[ms]이고, 정상상태의 위치편차는 0.521[%]이었으며, 오버슈트는 3.845[%]가 나타났다. 또한, 외란을 부가하였을 때의 최대 위치편차는 약 5.4[%] 정도로 나타났으며, 외란부가 후 정상상태 값의 ±0.1[%]이내로 재도달하는데 200[ms]정도가 소요되었다.

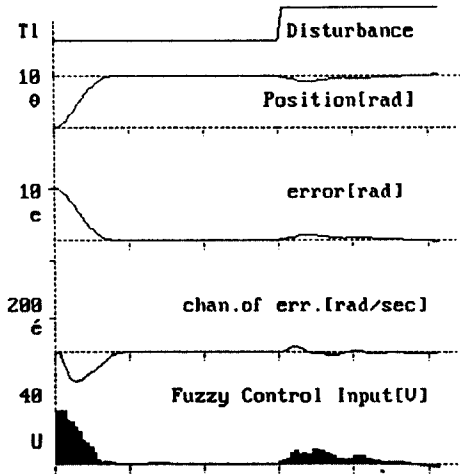
그림 7(a)는 개선된 퍼지 Rule을 적용한 결과로서 PID제어에 비해, 도달시간이 90[ms]로 5[ms]단축되었고, 정상상태 오차는 0.670[%]로 0.149[%]증가하였다. 오버슈트는 1.107[%]로 2.738[%] 감소되었으며, 외란을 부가하였을 때의 최대 위치편차는 약 603[%]로 2.797[%] 감소되었다. 또한, 외란부가 후 정상상태 값의 ±0.1[%]이내로 재도달하는데 180[ms]정도가 소요되었다.



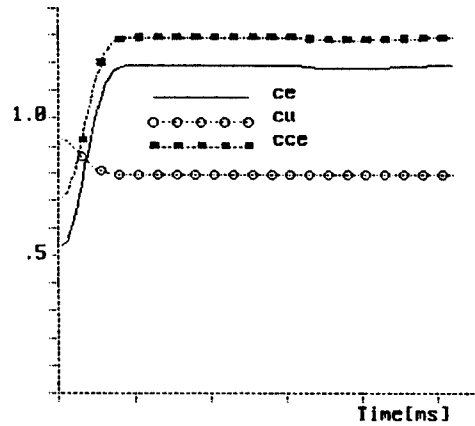
(a) 퍼지 룰만을 사용한 동특성 응답  
(a) Dynamic Responses using Fuzzy Rules



(a) 수정 윈도우링 기법을 이용한 경우의 동특성 응답  
(a) Dynamic Responses using Modified Windowing Techniques



(b) 윈도우링 기법을 이용한 경우의 동특성 응답  
(b) Dynamic Responses using Windowing Techniques



(b) 오차에 대한 스케일 팩터의 변화  
(b) variation curves of Scale Factors for error

그림 7. 룰에 기초한 퍼지 제어기의 동특성 응답  
Fig.7. Dynamic Responses for Rule-Based Fuzzy Controller(100[ms/div])

그림 8. 수정 윈도우링 기법을 이용한 퍼지 제어  
(100[ms/div])

Fig.8. Fuzzy control using Modified Windowing Techniques

퍼지 Rule의 개선만으로는 데이터의 양자화에 따른 정상상태의 잔류편차 및 외란 부가시 오차가 커지고 강인성이 저하되는 등 여러 가지 문제점이 나타나므로 만족한 결과를 얻을 수 없다. 따라서, 이를 보상하기 위해서 그림2와 같이 일반적인 원도잉 기법을 적용한 결과는 그림 7(b)와 같으며, PID제어에 비해 도달시간은 15[ms] 단축되었고, 정상상태 오차 및 오버슈트는 각각 0.174[%], 2.993[%] 감소되었으나, 3절에서 지적한 바와 같이 스케일 팩터를 계단狀으로 확장시키기 때문에 유연한 제어가 되지 못하고 과도하게 확장시 미소한 외란에도 불안정해 질 뿐만 아니라 정확한 스케일 팩터를 찾아야 한다. 이러한 문제를 보상하기 위해서 본 논문에서 제시하는 식(9) - (11)의 함수를 이용한 수정 원도잉 기법의 적용 결과는 그림8과 같다.

그림8(a)는 수정 원도잉 기법을 적용한 결과로서 기존의 원도잉 기법보다 도달시간이 10[ms] 단축되었고, 정상상태의 오차 및 오버슈트도 각각 0.291 [%], 0.803[%] 감소되었다. 또한, 외란을 부가했을 때도 위치 변동이 거의 나타나지 않았으며, PID제어에 비해서도 외란에 대해 아주 강인성있는 안정한 제어가 가능함을 알 수 있었다. 그림8(b)는 수정 원도잉 기법에 적용한 스케일 팩터의 값을 나타내는 곡선이다.

정상상태의 CE, CCE, CU값은 각각 1.2, 1.3, 0.8이 되었으며 DCE, DCCE, DCU값은 각각 0.08, 0.06, 0.015으로 하였다.

이상의 결과를 표3에 나타내었다.

Table3. Simulation results

표3. 시뮬레이션 결과

| 구분         | S.S.     | R.T. | O.V.  | E <sub>max</sub> D. | R.T <sub>D</sub> . |
|------------|----------|------|-------|---------------------|--------------------|
| 제어         | error[%] | (ms) | (%)   | error[%]            | [ms]               |
| PID        | -0.521   | 95   | 1.845 | 5.400               | 200                |
| Fuzzy      | -0.670   | 90   | 1.107 | 2.603               | 180                |
| Fuzzy+WT.  | -0.347   | 80   | 0.852 | 0.501               | 120                |
| Fuzzy+MWT. | -0.056   | 70   | 0.049 | 0.060               | 30                 |

※S.S. : Steady State, R.T. : Reaching Time  
 R.T<sub>D</sub> : Reaching Time after Disturbance Addition  
 E<sub>max</sub>D. : Maximum Error after Disturbance Addition  
 O.V. : Overshoot, WT. : Windowing Technique  
 MWT. : Modified Windowing Technique

이상에서 고찰한 바와 같이 PID 제어인 경우 정상상태의 편차는 적지만 외란이 부가되었을 때 편차가 크게되는 결점이 있었으며, 제어인 경우 기동 및 외란 등의 과도상태에는 양호한 특성을 가지지만 다소 큰 정상상태 편차를 갖고 있는 것을 알 수 있었다. 따라서, 이를 보상하기 위하여 종전의 원도잉 기법을 적용한 결과 도달시간 및 오버슈트와 외란 부가시 최대 편차량이 어느 정도는 보상이 가능하였지만 스케일 팩터의 조정을 오차에 대해 단계적으로 변화시키기 때문에 유연한 제어가 되지 못하였다. 이를 보상하기 위하여 본 논문에서 제안하는 수정 원도잉 기법을 적용한 결과 정상상태의 편차 및 내·외부 외란 부가시 최대 편차량이 아주 미소하게 되는 등 본 제어기법이 강인성 있는 우수한 제어임이 입증되었다.

## V. 결 론

일반적으로 서보 시스템에 PID제어를 하는 경우 정상편차는 적지만 내·외부 외란에 대한 과도응답이 악화되는 문제점이 있다. 또한, 퍼지제어는 부하 변동에 대해 과도특성은 양호하지만 정상편차가 존재하는 결점이 있으며, 제어시간을 단축시키기 위하여 퍼지 Rule의 전건부 변수인 오차와 오차의 변화율을 양자화한 ROM테이블 방식을 많이 사용하는데, 이때 양자화 레벨을 너무 작게 잡으면 그만큼 메모리 용량도 커지고 처리 시간도 많이 걸리게 되며, 양자화 레벨의 크기에 따라 정상상태의 오차가 그만큼 존재하기 때문에 항상 정상상태의 오차가 남게 된다. 따라서, 이를 감소시키기 위해 퍼지제어시 원도잉 기법을 사용하고 있지만 오차의 값을 계단狀으로 나누어 스케일을 확장하기 때문에 유연한 제어가 되지 못하고 스케일을 지나치게 확장한다든지 외란 부가시 스케일 팩터값이 적정하지 못하여 오히려 시스템이 불안정해지는 문제점을 갖고 있다.

따라서, 본 논문에서는 지수함수 형태의 식을 이용하여 스케일 팩터를 연속적으로 조정할 수 있는 새로운 수정 원도잉 기법을 제안하였다. 이를 직류 서보 시스템의 위치제어에 적용한 결과, 도달시간, 정상상태의 편차 및 외란을 부가했을 때 최대 편차량의 감소 등 특성이 PID제어나 종전의 원도잉 기법에 비해 크게 향상되었음을 확인하였다.



참고문헌

1. 本多中二, 大里有生, “ファジイ工學入門”, 海文堂, 1989
2. Y.E. Li and C.C. Lau, “Development of Fuzzy Algorithms for Servo Systems,” IEEE, Control Systems Magazine, pp.65~72 April.1989
3. 水本雅晴, “Fuzzy論理と近似的推論, 數理科學別冊”, vol.10, pp.101~112, 1988
4. 松永信智, 川路茂保, “DC モータのファジ-ハイブリッド制御”, 日本電學論D, vol.111, no.3, pp. 195~200, 1991
5. M.Braae and D.A.Rutherford, “Fuzzy Relations in a Control Setting”, Kybernetes, 7, pp. 185~188, 1978
6. Witold Pedrycz, “Fuzzy Control and Fuzzy Systems”, John Wiley and Sons, N.Y., 1989
7. Chuen Chien Lee, “Fuzzy Logic in Control Systems : Fuzzy Logic Controller Part I”, IEEE Trans., vol.20, no.2, pp.404~417, March /April, 1990.
8. 朴玟用, 崔恒植 譯, “퍼지시스템의 응용입문”, 大英社, 1990.



**李五杰(Oh Geol Lee) 정회원**  
 1955年 12月 9日生  
 1984年: 동아대 공대 전기공학과 졸업(학사)  
 1986年: 동대학원 전기공학과 졸업(석사)  
 1990年: 동대학원 박사과정 수료  
 1989年 3月~현재: 동아대 강사

※주관심분야: Fuzzy 제어 및 Digital Signal Processor 설계



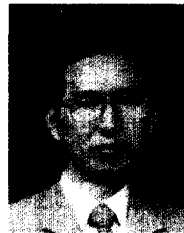
**盧鍾和(Jong Hwa Noh) 정회원**  
 1965年 4月 15日生  
 1990年: 동아대 공대 전기공학과 졸업(학사)  
 1992年: 동대학원 전기공학과 졸업(석사)



**李浚柝(Joon Tak Lee) 정회원**  
 1956年 11月 21日生  
 1979年: 동아대 공과대학 전기공학과 졸업(학사)  
 1981年: 동대학원 전기공학과 졸업(석사)  
 1983年~1984年: (주)금성사 근무  
 1988年: 중앙대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사)

1990年 3月~현재: 동아대 전기공학과 조교수

※주관심분야: Digital 제어시스템, Fuzzy 및 Neural Network controller 설계



**禹靖仁(Jeong In Woo) 정회원**  
 1941年 2月 12日生  
 1963年: 한양대 공대 전기공학과 졸업(학사)  
 1984年: 중앙대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사)  
 1985年~1986年: 일본동경공업대학 객원교수

1979年 3月~현재: 동아대 전기공학과 교수