

퍼지 가속도제어를 이용한 직류전동기의 강인한 위치제어

박귀태 이기상* 배상우 박태홍

고려대학교 전기공학과 *단국대학교 전기공학과

Robust Position Control of DC Motor using Fuzzy Acceleration Control

Gwi-Tae Park Kee-Sang Lee* Sang-Wook Bae Tae-Hong Park
 Dept. of Electrical Eng. Korea Univ., * Dept. of Electrical Eng. Dankook Univ.

ABSTRACT

A robust position control scheme for DC Motor is proposed based on Fuzzy Acceleration Control. Proposed control system has the similar structure that Y.Hori proposed. But the PI type acceleration controller of it is replaced by Fuzzy Logic Controller(FLC) which is known to be robust to the operating point and parameter variations.

By the simulation study for a real DC Motor, we have showed the superiority to the continuous PI acceleration controller in the view point of robustness to the operating point and parameter variations.

I. 서론

직류전동기의 위치 및 힘을 제어하기 위한 가속도제어의 개념이 여러 저자들에 의해 도입되었으며, 외란관측자를 이용한 전류제환 제어계보다 외란처리특성의 우수함이 실험적으로 증명되었다. [1-3] 이러한 성능개선의 이유는 직류전동기의 발생토오크 및 부하토오크 등의 각종 외란과 직접 관계하는 위치의 가속도를 직접 제어하는데 있다.

로보트 머니플레이터용 직류전동기의 위치제어를 위한 새로운 가속도 제어계를 Y.Hori가 제안하여 외란처리특성이 우수함을 보였다. [1,2] 그러나, 이 제어기는 가속도 제어기로서 일정한 이득을 갖는 일반적인 연속형 PI 제어기를 사용하였기 때문에, 다양한 동작영역에서 운전할 경우 일부 동작점에서 과도응답특성이 나빠지게 되며, 처리가능한 파라미터의 변동폭도 다양하게 못하게 된다.

따라서 본 연구에서는 프로세스 동작영역의 변동, 파라미터의 불확실성 및 변동에 대해 강인한 특성을 가짐으로 인해 최근 그 적용이 확대되고 있는 퍼지논리제어기(FLC)를 [4] 이용하여 가속도제어기를 구성함으로써, 직류전동기 위치제어계의 강인성을 개선할 수 있는 새로운 퍼지 가속도제어기를 제안한다. 그리고, 시뮬레이션에 의해 제안된 가속도제어기가 PI형 가속도 제어기에 비해 운전환경의 변동에 대한 강인성을 크게 개선함을 보인다.

II. 가속도제어기

본 절에서는 Y.Hori 가 제안한 PI 가속도제어기에 대해 간략히 기술한다. 먼저 가속도 위치 제어계의 해석을 위해 가속도항을 상태로 포함하고 있는 직류전동기의 등가블럭선도를 나타낸 것이 그림.1이다. 여기서, T_a 는 전기적 시정수로서 L/R 이고, T_m 은 기계적 시정수로서 $JR/K_T K_E$ 이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 직류전동기의 가속도는 전동기 발생토오크 뿐만 아니라 부하토오크, 마찰력, 원심력등에 의해 결정된다. 따라서 가속도를 직접 제어할 수 있다면 여러 가지 형태로 투입되는 외란의 영향을 효과적으로 제거할 수 있게 된다.

이와 같은 목적으로 설계된 PI형 가속도제어기의 구조는 그림.2 와 같다. 이 제어기에서는 비싼 가속도 센서를 사용하지 않기 위해, 측정된 속도 출력으로부터 추정한 가속도를 계산하여 제어기에 투입하며, 여기서, T_a 는 가속도추정기의 시정수

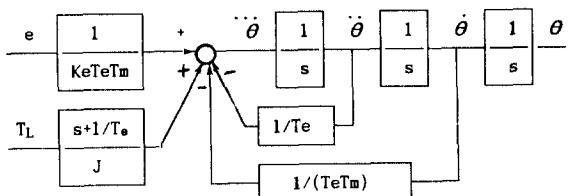


그림.1 직류전동기의 등가 블럭선도.

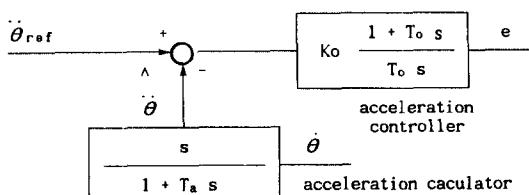


그림.2 가속도제어기와 가속도 추정기의 구조

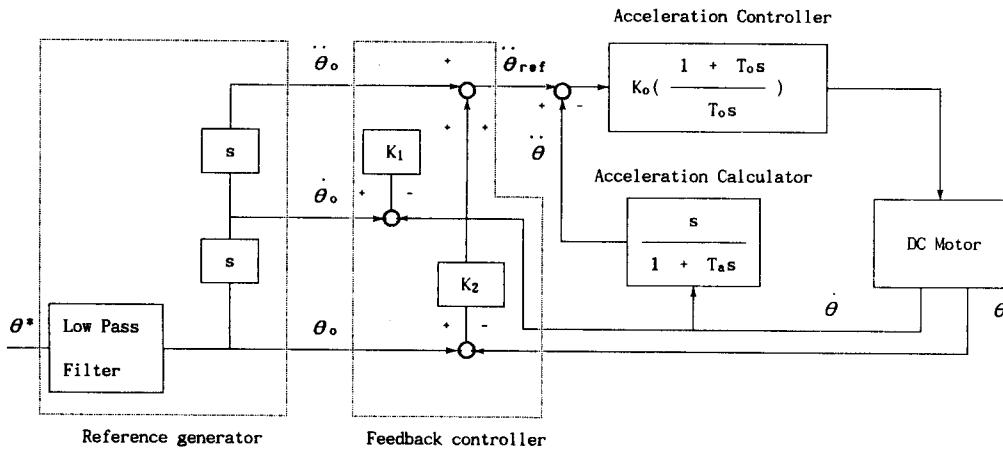


그림.3 PI 가속도제어계의 구조

이다. 이 제어기를 직류전동기 위치제어에 적용할 때, 전체 제어계의 각종 파라미터의 선정법 및 응답특성은 아래와 같다.

T_o 는 직류전동기의 전기자 전류에 해당하는 극점을 상쇄하도록 T_o 와 같은 선정하고, $T_a \ll T_m$ 이라 가정하면 기준가속도와 전동기 가속도간의 전달함수는 다음과 같게 된다.

$$\dot{\theta} = \frac{1}{1 + T_m' s} \dot{\theta}_{ref} \quad (1)$$

여기서, T_m' 는 가속도제어기의 투입시 전동기 가속도의 시정수로서 $T_m' = (K_E T_o / K_o) T_m$ 이며, K_o 의 선정에 의해 전동기의 가속도 응답속도를 원래의 응답속도에 비해 일의로 크게 개선할 수 있음을 알 수 있다.

식(2)는 위치, 외란간의 전달함수로서 이 제어기의 외란 제거능을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{B}{T_L} &= \frac{1}{J s^2} \frac{(T_m' + T_m) s}{1 + T_m' s + T_m' T_m s^2} \\ &\approx \frac{1}{J s^2} \frac{T_m' s}{1 + T_m' s} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, T_a 는 $T_a \ll T_m'$ 이 되도록 선정한 것으로 가정했으며, 위의 식으로부터 외란특성 또한 K_o 의 선정에 의해 T_m' 를 작게함으로써 외란에 대한 위치 응답시간 및 영향의 크기를 크게 개선할 수 있음을 알 수 있다.

위의 가속도제어기를 이용하여 구성한 직류전동기의 전체 위치제어계 구조는 그림.3과 같다. 전체 제어계는 위의 가속도

제어기와 기준입력 발생기 및 궤환제어기로 구성된다. 기준입력 발생기는 기준 위치 입력 θ^* 로부터 Power AMP의 안전성 및 출력한계를 고려하여 원하는 위치 궤적 θ_o 를 발생하는 저주파 통과필터, θ_o 를 추적할 수 있는 속도 및 가속도 기준입력을 발생하는 미분기들로 구성된다. 궤환제어기는 θ_o , $\dot{\theta}_o$, $\ddot{\theta}_o$ 와 측정된 θ , $\dot{\theta}$ 로부터 PI 가속도제어기에 투입되는 기준 가속도입력 $\dot{\theta}_{ref}$ 를 발생하는 부분이다. 그리고, 궤환제어기의 K_1, K_2 는 다음의 위치 추적오차를 제거할 수 있도록 선정한다.

$$\dot{\theta}_{ref} = \dot{\theta}_o + K_1(\dot{\theta}_o - \dot{\theta}) + K_2(\theta_o - \theta) \quad (3)$$

III. 퍼지 가속도제어기

전철의 PI 가속도제어기가 부하토오크등 직류전동기의 각종 외란과 직접적인 관계가 있는 가속도를 제어함으로 인해 원천적으로 부하변동 및 파라미터 변동에 대해 강인한 특성을 가지고, 가속도제어기의 PI 이득을 일정하게 선정하였을 경우 기준입력의 변화, 기준위치궤적의 변화와 같이 동작영역이 다양하게 요구되면 직류전동기의 입력 한계때문에 과도상태응답이 나빠질 수 있으며, 또한 페루프 특성방정식의 변동으로 그 영향을 제거할 수 있는 파라미터의 변동폭도 크지 않게 된다.

따라서, 본 절에서는 동작영역의 다양한 변화 및 파라미터의 큰 변동에도 강인한 위치제어를 할 수 있도록 FLC를 이용하여 가속도제어기를 구성하며, 제안된 퍼지 가속도제어기를 포함하는 직류전동기 위치제어계의 전체적인 구조는 그림.4와 같다.

먼저 퍼지 가속도제어기의 제어규칙을 결정하기 위해 기준위치입력에 대한 기준가속도 $\dot{\theta}_{ref}$ 와 추정된 가속도 $\dot{\theta}$ 와의 관계를 나타낸 것이 그림.5이다. 가속도 추적오차와 오차 변화량을 다음과 정의하고, 제어입력을 증분형태로 취하면 그

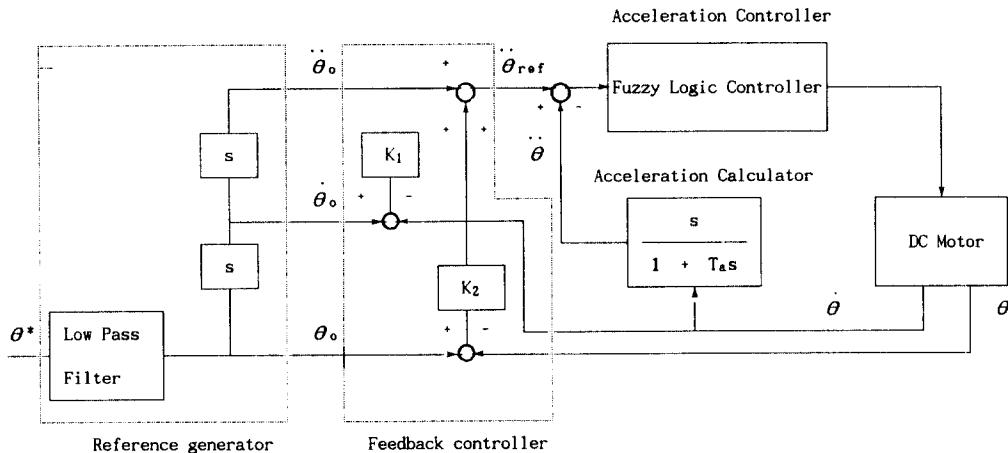


그림.4 퍼지 가속도제어계의 구조

림.5에서 각 구간별 제어규칙을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} e &= \dot{\theta}_{ref} - \dot{\theta} \\ ce &= e_k - e_{k-1} \\ u &= u_i + \Delta u_i \end{aligned} \quad (4)$$

- I: IF (e =Positive) and (ce =Positive) then Δu_i =Positive
- II: IF (e =Positive) and (ce =Negative) then Δu_i =Negative
- III: IF (e =Negative) and (ce =Negative) then Δu_i =Negative
- IV: IF (e =Negative) and (ce =Positive) then Δu_i =Positive

위의 구간별 제어규칙 형태가 일정기준입력에 대한 제어규칙과 같은 양상으로 가속도 제어를 위한 제어규칙도 MacVicar Whelan의 Meta rule에 의해 다음의 표.1과 같이 선정할 수 있다.[5]

Change of Error					
	NB	NS	ZO	PS	PB
E	NB	NB	NM	NS	ZO
r	NS	NB	NM	NS	ZO
r	ZO	NM	NS	ZO	PS
o	PS	NS	ZO	PS	PM
r	PB	ZO	PS	PM	PB

표 1. 가속도 제어를 위한 제어규칙

퍼지 가속도제어기에서의 퍼지 추론은 Mamdani의 Min-Max Compositional Rule에 의해, 그리고 비퍼지화는 식(5)와 같이 무게중심법에 의해 수행된다.[6]

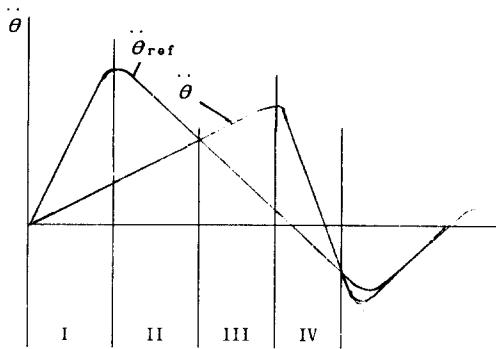


그림.5 기준가속도입력 $\dot{\theta}_{ref}$ 와 직류전동기의 가속도 $\dot{\theta}$ 의 변화추이

$$\Delta u_i = \left[\sum_{j=1}^N (\text{Action}_j) (\text{Membership value}_j) \right] / \left[\sum_{j=1}^N (\text{Membership value}_j) \right] \quad (5)$$

마지막으로 직류전동기의 위치제어에 투입되는 퍼지 가속도 제어기는 운전환경의 다양한 변화에 적응할 수 있도록, 그리고 정상상태 오차를 효과적으로 제거할 수 있도록 Coarse control과 Fine control 두 부분으로 나뉘어서 투입된다. 즉, 초기의 가속도 추적오차가 클 경우엔 큰 입력을 발생하여 빠른 응답특성을 얻을 수 있도록 가속도추적오차와 오차변화량의 전체공간(Universe of discourse)을 크게 설정한 Coarse control을 이용하여 제어하고, 추적오차가 작게되면 FLC의 단점인 정상상태에서의 진동현상과 정상상태 오차가 허용치내에

있도록 전체공간을 작게 설정한 Fine control 을 이용하여 제어한다.

위와 같이 설계된 퍼지가속도제어계는 Y.Hori 의 PI 가속도 제어기에 비해, 기준위치입력의 보다 다양한 변화에도 거의 동일한 부하토오크 및 전동기 파라미터에 대한강인성을 유지할 수 있다. 또한 FLC 가 원래 비선형제어기이므로 저주파통과필터의 시정수변화에 의해 원하는 위치응답시간이 변동되더라도 큰 특성변화가 없이 원하는 위치궤적을 추적할 수 있다.

또 하나 특기할 점은, PI 가속도제어기에서는 가속도 추정기의 시정수 T_a 가 T_m 에 비해 매우 작은 값이 되도록 선정하여야 하므로, 파라미터의 큰 변동시 페루프의 특성 변화로 제어계의 응답특성이 치명적인 영향을 미칠수 있다. 그러나, 제안된 퍼지 가속도제어기에서는 가속도추정기를 이득이 1 인 저주파 통과필터의 특성을 갖도록 설계함으로써, 그러한 큰 특성변화없이 가속도의 섭동에 의한 진동현상까지 감소시킬 수 있다.

IV. 시뮬레이션 연구

본 절에서는 제안된 퍼지가속도제어기를 이용한 위치제어계를 직류전동기의 실제 파라미터에 대해 적용하여, 시뮬레이션을 통해 Y.Hori의 PI 가속도제어계와 성능을 비교하여 그 유용성을 보인다.

시뮬레이션에 사용한 직류전동기는 $\pm 8 V$ 의 입력한계를 갖는 소형 직류전동기로서 각 파라미터들은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} B &= 0.000001 [N\cdot m \cdot sec^2] & K_t &= 0.03582 [N\cdot m/A] \\ Ke &= 0.03582 [V\cdot sec/rad] & R &= 15.1 [\Omega] \\ L &= 0.0053 [H] & J &= 0.000012166 [V\cdot m\cdot sec^2] \end{aligned}$$

먼저, 퍼지 가속도제어기에서 정의한 가속도추적오차 e_k , 그 변화량 ce_k 와 입력증분 Δu_k 의 언어값 및 소속함수를 Coarse control, Fine control 에 대해 그림.6 에 나타내었으며 K_1 , K_2 및 T_a 는 각각 40, 400, 0.03 이다.

성능비교에 사용된 PI 가속도제어계에서의 K_0 , K_1 , K_2 , T_a 는 각각 0.0003, 40, 400, 0.0002, T_o 는 T_e 와 같은 0.000351 로 선정하였다. 그러면 $T_m' = 0.006$ 이 되어 원래 전동기의 기계적 시정수 $T_m = 0.1432$ 보다 응답속도가 약 24 배 빠르게 설계한 것이 된다.

또한, 기준입력발생기와 궤환제어기는 두 제어기 모두 Bilinear transform에 의해 디지털화(Sampling time은 0.001 초)하고, PI 가속도제어기는 아날로그로, 퍼지 가속도제어기는 디지털로 실현하는 것으로 시뮬레이션하였다.

두 제어기의 성능비교를 위해 다양한 운전환경에 대한 시뮬레이션 결과를 그림.7 - 그림.16 에 나타내 보였다.

SETPOINT가 1이고, 파라미터 변화가 없는 경우(그림.7 - 10), 와 J 가 1/10로 감소하는 부하가 투입되는 경우(그림.13,14 (b))각 기준위치궤적에 대해 제안된 제어기도 좋은 성능을 보이나 PI 가속도제어기의 위치응답과 부하응답이 더

나온 것을 알 수 있다. 그러나, SETPOINT가 10으로 설정되어 운전영역이 바뀐 경우(그림.13), J 가 5 배로 증가하는 부하가 투입되는 경우(그림.15(a))에는 PI 가속도제어기의 과도응답에서 오버슈트가 발생함을 볼 수 있으며, 특히 SETPOINT가 10 일때 J 가 5 배로 증가하는 부하가 투입된 경우에는 극심한 진동으로 위치를 전혀 추적하지 못함을 볼 수 있다(그림.17 (a)). 그러나 제안된 제어기는 운전환경이 다양하게 변화하여도 큰 특성변화가 없는 응답특성을 보임을 알 수 있다.

V. 결 론

직류전동기의 강인한 위치제어를 위한 새로운 퍼지 가속도 제어기를 제안하고, 시뮬레이션에 의해 그 유용성을 보였다. 제안된 제어기를 포함하는 직류전동기의 위치제어계는 동작영역 및 전동기 파라미터의 변동에도 강인한 특성을 가지며, 그 성능이 Y.Hori가 제안한 PI 가속도제어기에게 비해 우수함을 알 수 있었다. 또한 FLC가 원래 비선형제어기임으로 인해 원하는 위치궤적이 변동하여도 위치추적특성에 큰 변화가 없음을 알 수 있었다.

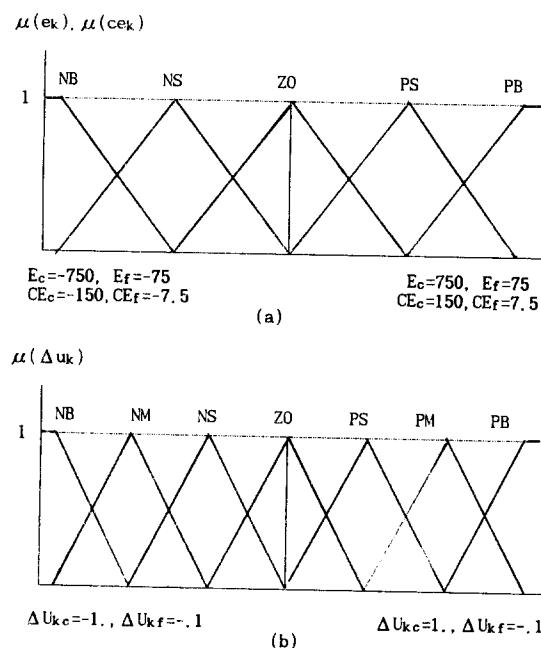


그림.6 (a) e_k , ce_k , (b) Δu_k 의 언어값 및 소속함수

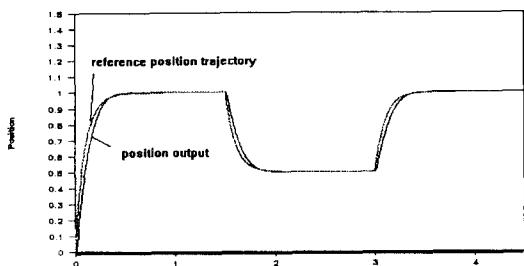


그림. 7 퍼지 가속도제어계의 위치응답특성(SETPOINT = 1 [rad], 무부하, J, L= Normal)

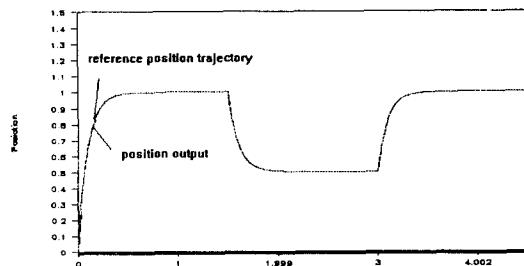


그림. 8 PI 가속도제어계의 위치응답특성(SETPOINT = 1 [rad], 무부하, J, L= Normal)

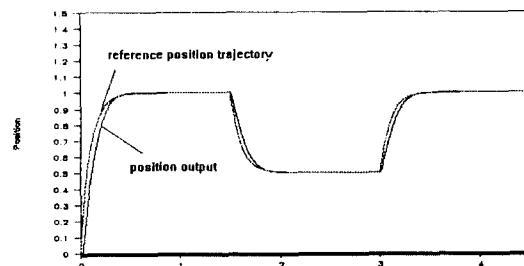


그림. 9 퍼지 가속도제어계의 부하응답특성(SETPOINT = 1 [rad], $T_L = 0.01$ [N·m], J, L= Normal)

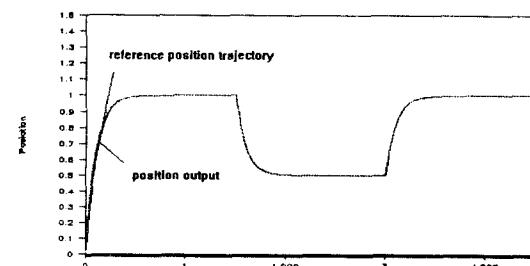


그림. 10 PI 가속도제어계의 부하응답특성(SETPOINT = 1 [rad], $T_L = 0.01$ [N·m], J, L= Normal)

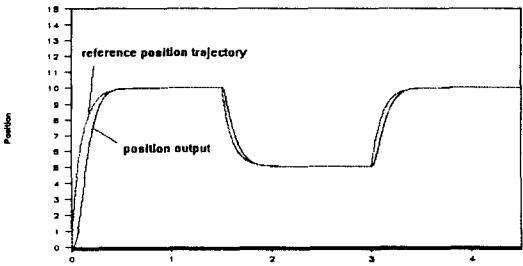


그림. 11 운전영역 변화시 퍼지 가속도제어계의 부하응답특성(SETPOINT = 10 [rad], $T_L = 0.01$ [N·m], J, L= Normal)

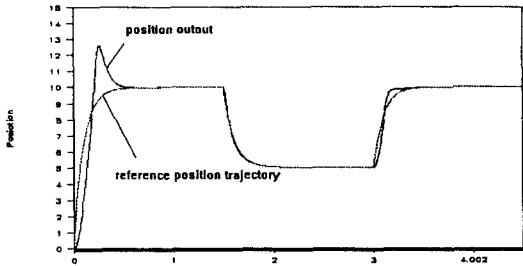
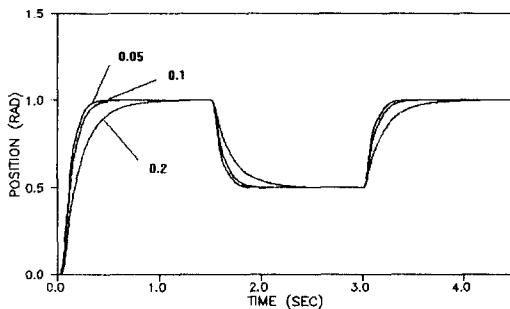
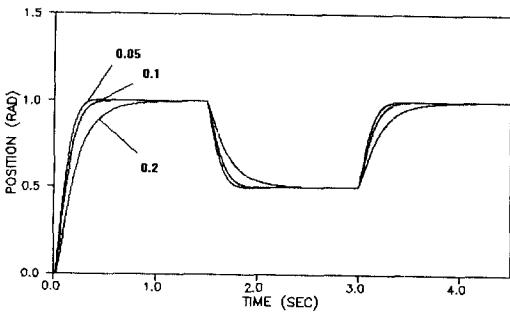


그림. 12 운전영역변화시 PI 가속도제어계의 부하응답특성(SET POINT = 10 [rad], $T_L = 0.01$ [N·m], J, L= Normal)

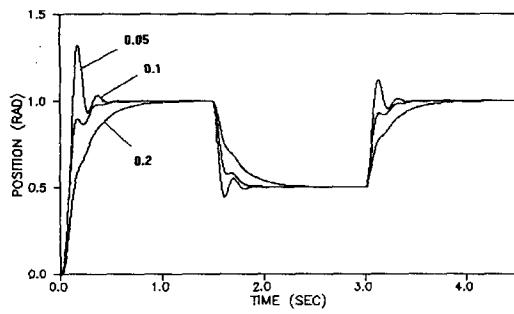


(a)

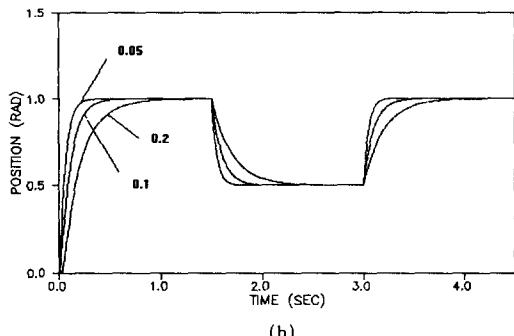


(b)

그림. 13 파라미터 및 기준위치계적 변화시 퍼지 가속도 제어계의 부하응답특성(SETPOINT = 1 [rad], $T_L = 0.01$ [N·m], L= 5 배로 증가) (a) J 5 배로 증가, (b) J 1/10로 감소

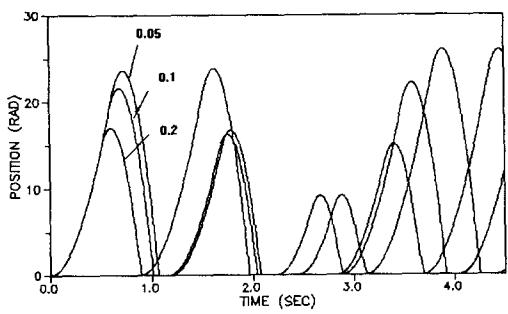


(a)

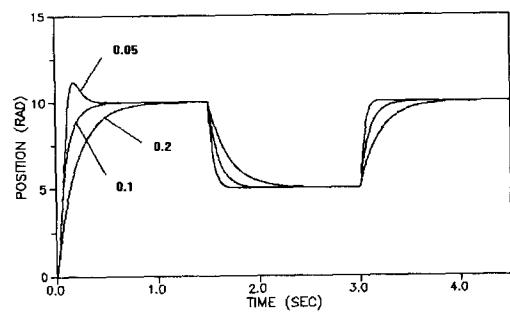


(b)

그림.14 파라미터 및 기준위치제적 변화시 PI 가속도제어계의 부하응답특성(SETPOINT = 1 [rad], $T_L = 0.01$ [N·m], $L = 5$ 배로 증가) (a) J 5배로 증가, (b) J 1/10로 감소

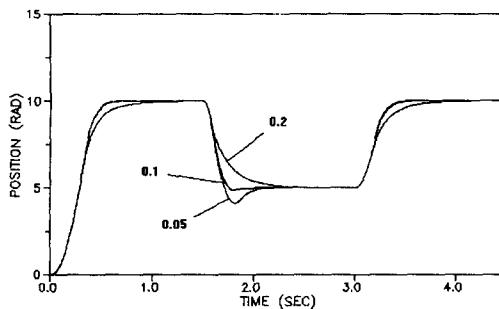


(a)

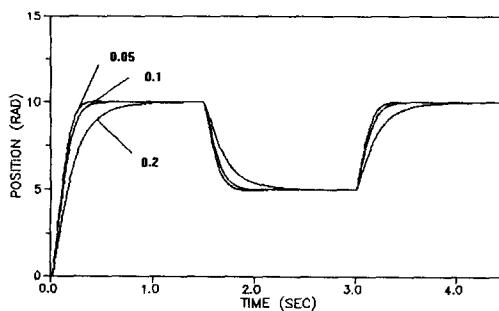


(b)

그림.16 파라미터 및 기준위치제적 변화시 PI 가속도제어계의 부하응답특성(SETPOINT = 10 [rad], $T_L = 0.01$ [N·m], $L = 5$ 배로 증가) (a) J 5배로 증가, (b) J 1/10로 감소



(a)



(b)

그림.15 파라미터 및 기준위치제적 변화시 퍼지 가속도제어계의 부하응답특성(SETPOINT = 10 [rad], $T_L = 0.01$ [N·m], $L = 5$ 배로 증가) (a) J 5배로 증가, (b) J 1/10로 감소

참고문헌

- [1] Y.Hori, "A Novel Servo System Design Methods Based on the Acceleration Control", IEEE IECON'88, session 3, 5, Singapore, 1988.
- [2] Y.Hori, "Position and Mechanical Impedance Control Method of Robot Actuators Based on the Acceleration Control.", IEEE, 1990.
- [3] J.Y.S.Luh, "Resolved Acceleration Control of Mechanical Manipulators", IEEE Trans. on AC, 25-3, pp. 468-474, 1980.
- [4] Witold Pedrycz, "Fuzzy Control and Fuzzy Systems", Research Studies Press LTD, 1989.
- [5] P.J. MacVicar-Whelan, "Fuzzy sets for man-machine interaction," Int.J. Man-Machine Studies, Vol.8 pp.687-697 , Nov.1976 .
- [6] E.H.Mamdani, S.Assilian, "An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller." Int. J. Man - Machine study vol. 7. pp 1-13, 1975.