

VCR용 드럼 모터의 퍼지 속도/위상 제어기 설계

박귀태 이기상* °박태홍 배상우 이상락

고려대학교 전기공학과 *단국대학교 전기공학과

Design of Fuzzy Speed/Phase Controller for Drum Motor in Home VCR

Gwi-Tae Park Kee-Sang Lee* °Tae-Hong Park Sang-Wook Bae
Sang-Lak Lee

Dept. of Elec. Eng. Korea Univ. *Dept. of Elec. Eng. Dankook Univ.

Abstract

Recently, digital techniques have been applied to servo systems of the home VCR, which result in high accuracy, high stability and a small number of parts required. The servo systems are now becoming more complex because the latest home VCRs are strongly required to have many functions. Given these circumstances, software servo concepts were introduced to the VCR servo system with microprocessor. But there are some difficulties in the conventional digital PID controller, e.g. calculating the exact gains or dynamics. In this paper, we introduce FLC(Fuzzy Logic Controller) to the speed/phase control for VCR drum motor. To show the usefulness of the proposed controller, some studies are discussed by simulation and experiment.

1. 서 론

가정용 VCR의 서보 계통에는 70년대 말부터 디지털 기법이 적용되어 왔으며 이로 인해 고정밀도, 고안정도 및 소형화가 가능해졌으나 최근 VCR 기능의 다양화로 서보 전용 디지털 IC만으로는 성능향상이 어렵게 되었다. 이에 대한 대안으로 소프트웨어로 서보를 대치한 소프트웨어 서보의 개념이 마이크로프로세서를 통해 등장하게 되어 서보에 대한 알고리즘을 쉽게 적용할 수 있게 되었다. 그러나 기존 대부분의 VCR용 드럼 모터의 속도 제어는 디지털 PID 이론에 의한 것으로 원하는 성능을 얻기 위한 PID 이득의 선정에 어려움이 있으며 성능 향상의 여지가 많은 것으로 알려지고 있다. 따라서 본 연구에서는 최근 관심이 높아지고 있는 퍼지 이론을 이용한 제어기를 구성하여 화질에 많은 영향을 주는 VCR 헤드 드럼용 BLDC 모터의 속도와 위상 - 테입과 헤드 사이의 상대 위치 - 을 제어하고 기존의 제어기에 의한 결과와 그 성능을 비교, 검토하고자 한다.

2. 드럼 서보계

VCR에는 보통 여러개의 서보 루프가 - 드럼 서보, 캡스텐 서보 등 - 존재한다. 비디오 헤드가 부착된 드럼을 회전시키는 드럼서보계에는 두개의 분리된 제어 루프가 사용된다. 하나는 드럼을 컬러 TV의 프레임 주파수인 30 rps(정확하게 29.97 rps : NTSC)로 회전시키는 속도 제어 루프이고 또 다른 하나는 위상에 관한 루프이다. 위상 제어 루프는 수직 동기

신호가 발생되는 정확한 순간에 비디오 트랙의 정해진 점을 비디오헤드가 통과하도록 하는 제어 루프이다. 이 속도/위상 제어 루프는 먼저 속도가 목표치에 달성된 후 정상상태에서 약간의 속도 가감속으로 위상제어를 하도록 되어 있다. 그림 1은 VCR용 드럼 모터에 대한 디지털 서보 제어계를 나타낸다. 사용된 제에게는 크게 드럼 모터 및 구동 IC, FLC, 속도 및 위상 검출부로 구성되어 있다. 또한 사용된 제어계에는 두 개의 독립적인 샘플러가 있는데 하나는 정확한 속도 정보를 얻기 위한 시변 샘플러이고 다른 하나는 위상 오차를 검출하기 위한 시불변 샘플러이다. 따라서 다중 샘플링 기법의 도입이 필요하나 FLC구성으로 그러한 개념도입 없이도 제어할 수 있도록 하였다.

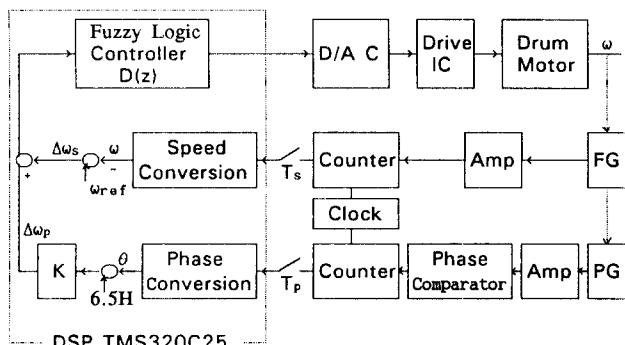


그림 1. 가정용 VCR 드럼 모터의 디지털 서보 계통

2-1. 드럼 모터 및 구동 IC

사용된 드럼 모터는 전류 구동 IC가 있는 2상 BLDC 모터이다. 전류 구동 IC는 여자 될 상의 순서를 결정하며 제어 입력에 대하여 그에 비례하는 구동전류를 발생시키거나 그 구조상 역기전력 V_{emf} 와 전원전압 V_{cc} 의 차이를 아마츄어 저항 R 로 나눈 전류값이 그 한계치가 된다. 그림 2.는 이를 모델링한 모터 계통의 블록 다이어그램이다. 사용된 구형파 전류 구동방식 BLDC 모터의 동특성은 정류시의 과도상태를 무시하면 DC 모터의 동특성과 유사하다. 모터의 특성상 인덕턴스와 마찰계수 B 는 무시할 수 있을 만큼 작은 값이고 기타 제 상수는 표 1.과 같다.

표 1. BLDC motor 파라미터

Definition	Symbol [unit]	Parameter value
Torque constant	K_T [N·m/A]	0.02744
Back emf constant	K_E [V s/rad]	0.0422
Armature resistance	R [Ω]	11.05
Inertia	J [N·m·sec ²]	0.0000588

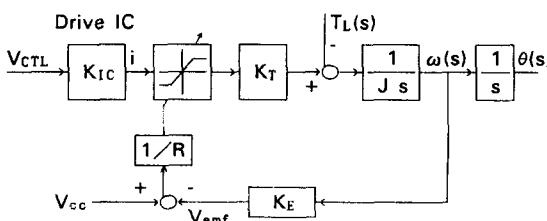


그림. 2 구동용 IC를 포함한 VCR 드럼 모터 계통도

2-2. 제어계 구성

제어시스템은 그림 3.과 같이 IBM-386 Host PC, DSP, 통신 Interface, Counter, D/A Converter등으로 구성되어 있다.

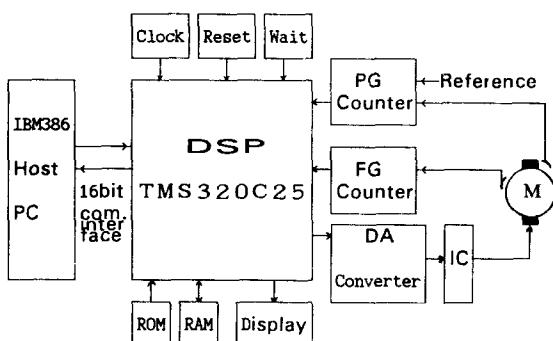


그림 3. 제어를 위한 하드웨어 구성도

속도 검출은 1 회전당 24개의 펄스를 발생시키는 드럼 모터 FG(Frequency Generator) 신호의 한 주기동안을 2.5Mhz의 기준 클럭 펄스(fCLK)로 계수함으로써 이루어진다. 그림 4.에 나타난 바와 같이 카운터는 FG 신호의 상승순간부터 다음 상승시까지의 클럭을 계수하고 DSP는 매 상승순간마다 인터럽트되어 카운터를 읽고 clear한다. 드럼 모터는 정상상태에서 30 rps로 회전하여야 하므로 기준속도 ω_{ref} 는 식 (1)과 같이 주어진다.

$$\omega_{ref} = 30 \text{ rps} = 60\pi \text{ [rad/sec]} \quad (1)$$

FG 신호의 한 주기동안 카운터에 계수된 값을 N_{FG}라 할때 드럼 모터의 회전속도는 식 (2)와 같이 계산할 수 있다.

$$\omega = \frac{\theta}{T} = \frac{2\pi/24}{N_{FG} f_{CLK}^{-1}} = \frac{\pi f_{CLK}}{12 N_{FG}} \text{ [rad/sec]} \quad (2)$$

따라서 속도 오차 $\Delta\omega$ 는 식 (3)과 같이 계산된다.

$$\Delta\omega_s = \omega_{ref} - \omega \quad (3)$$

식 (2)에서 계산된 속도 ω 는 FG신호의 한 주기동안의 평균 속도이며 근사적으로 샘플링 주기 중앙에서의 순간 속도로 생각할 수 있다. 그림 5는 위상 검출부의 신호를 나타낸다. 위상 비교기는 비디오 기준 신호 멀스(30Hz)와 드럼 모터 1 회전당 한 개의 펄스를 발생시키는 PG(Pulse Generator) 와의 위상차에 따라서 양 또는 음의 위상 오차 펄스를 발생시킨다. PG 카운터는 이 오차 펄스 신호가 High(ΔT_p)인 동안 기준 클럭 펄스수를 계수하여 위상오차를 계산한다. 계수된 PG 카운터의 값을 N_{PG}라 할 때 위상 오차 $\Delta\theta_p$ 는 식 (4)와 같이 계산 할 수 있다.

$$\Delta\theta_p = \omega \Delta T_p = \omega N_{PG} f_{CLK}^{-1} \text{ [rad]} \quad (4)$$

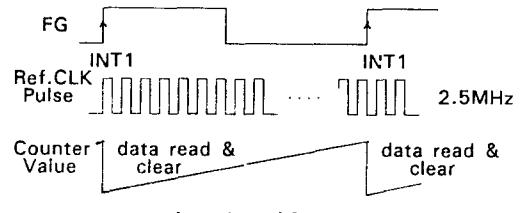


그림 4. 속도 검출

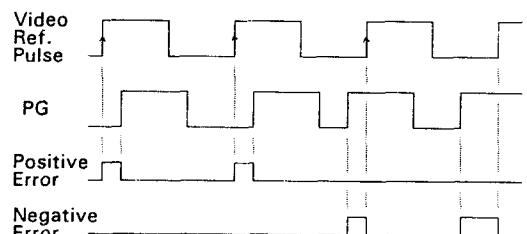


그림 5. 위상 오차 검출

3. FLC 설계

서론에서 언급한 바와 같이 속도제어 루프는 항상 동작되지만 위상제어 루프는 속도가 기준 속도의 정해진 범위 이내에 도달할 때에 동작하도록 속도제어는 Coarse FLC, 위상 제어는 Fine FLC로 분리하여 구성하였다.

FLC의 설계는 일반적으로 다음과 같은 세가지 과정으로 설계된다.[2]

- 1) 제어규칙(Control Rule)의 설정
- 2) 퍼지화(Fuzzification) 및 퍼지추론(Fuzzy Inference)
- 3) 비퍼지화(Defuzzification)

이상의 설계과정을 본 논문과 관련하여 좀더 구체적으로 살펴보면 아래와 같다.

3-1. 제어규칙의 선정

사용된 제어규칙은 MacVicar-Whelan [4]이 사용한 PI 형태의 meta-rule을 사용하였다. 따라서 이는 널리 알려진 바와 같이 다음 식 (5)와 같은 IF-THEN 형태의 언어적 제어 규칙으로 표현된다.

$$\begin{aligned} R_1 &: \text{IF } (E = PB \text{ and } CE = PS) \text{ THEN } (\Delta U = PB) \\ R_2 &: \text{IF } (E = PS \text{ and } CE = NS) \text{ THEN } (\Delta U = NB) \\ R_3 &: \text{IF } (E = ZO \text{ and } CE = ZO) \text{ THEN } (\Delta U = ZO) \\ &\vdots \\ R_i &: \text{IF } (E = E_i \text{ and } CE = CE_i) \text{ THEN } (\Delta U = U_i) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 속도오차 및 위상오차를 식 (3)과 (4)에서 계산된 기준치 - 현재치라 할때 E, CE, ΔU는 입출력 변수로서 다음과 같이 정의하였으며, α 는 Coarse 제어시 속도오차의 비중을 크게하고, β 는 Fine 제어시 위상오차의 비중을 크게 하기 위하여 적당한 값을 갖도록 하였다.

$$\begin{aligned} E &= \alpha(\text{속도 오차}) + \beta(\text{위상 오차}) \\ CE &= E(k) - E(k-1) \\ \Delta U &= \text{제어입력의 중분} \end{aligned} \quad (6)$$

또한 현재 투입될 제어입력 $U(k)$ 는 PI형태와 같이 식 (7)과 같은 충분 형태로 사용되고 전체적인 제어규칙은 표 2.와 같다.

$$U(k) = U(k-1) + \Delta U(k) \quad (7)$$

표 2. PI형 퍼지 제어기를 위한 제어규칙

E	NB	NS	ZO	PS	PB
r	NB	NB	NM	NS	ZO
r	NS	NB	NM	NS	ZO
o	ZO	NM	NS	ZO	PS
r	PS	NS	ZO	PS	PM
(Ec)	PB	ZO	PS	PM	PB

3-2. 퍼지화 및 퍼지추론

퍼지화 및 퍼지추론과정은 퍼지 알고리즘이 제어목적으로 페루프에서 사용될 때 계통으로부터 관측된 비퍼지 표현의 입력을 퍼지화하고 이에 대한 퍼지 제어입력을 계산하는 과정이다. 본 연구에서는 여러가지 방법 중 Singleton 형태의 퍼지 집합을 도입하여 입력변수를 퍼지화시키고 이 변수를 Mamdani가 제안한 Min-Max Composition 추론법칙에 의하여 추론에 이용하였다.[2]

식 (5)에서 표현된 IF..THEN 형식의 모든 제어규칙을 퍼지관계의 형태로 모든 규칙을 표현하면 식 (8)과 같다.

$$R = R_1 \cup R_2 \cup \dots \cup R_N$$

$$\mu_{R(E,CE,U)}(u,v,w) = \max\left(\sum_{i=1}^N \min[\mu_{E_i}(u), \mu_{CE_i}(v), \mu_{U_i}(w)]\right) \quad (8)$$

여기서,

μ : 귀속함수 값, N : 규칙의 개수.

$u, v, w : u \in U, v \in V, w \in W$ (U, V, W : 전체 공간)
 $E_i, CE_i, U_i : 언어변수 E, CE, U의 언어적 수치.$

그러면 Min-Max Composition에 의하여 구한 제어입력의 귀속함수는 식 (9)와 같이 된다.

$$\begin{aligned} \mu_U(k)(w) &= \max\{\min[\mu_E(k)(u), \mu_{CE}(k)(v), \mu_R(E,CE,U)(u,v,w)]\} \\ \mu_U(k)(w) &= \max\left\{\sum_{i=1}^N \min[\mu_{E_i}(E_o(k)), \mu_{CE_i}(CE_o(k)), \mu_{U_i}(w)]\right\} \end{aligned} \quad (9)$$

여기서, $E_o(k)$, $CE_o(k)$ 는 계통에서 실제로 측정되어 퍼지화되기 전의 값이다.

3-3. 비퍼지화

비퍼지화는 제어입력의 귀속함수를 사용하여 계통에 투입될 제어입력을 결정하는 과정이다. 이 과정은 최대치 방법과 무게중심법(center-of-gravity) 등이 있으나 여기서는 식 (10)과 같이 가장 일반적으로 사용되는 무게 중심법을 이용하였다.

$$\Delta U(k) = \left[\sum_{i=1}^N (Action_i \times \mu_i) \right] / \left[\sum_{i=1}^N \mu_i \right] \quad (10)$$

Action_i는 i 번째 규칙의 결론부에서 귀속값이 최대로 되는 제어입력이고, μ_i 는 식 (9)에서 구한 Action_i의 귀속값이다.

4. 시뮬레이션 및 실험결과 검토

3 장에서 언급한 FLC 에 의하여 그림 2.에서 나타낸 VCR BLDC 모터에 대하여 시뮬레이션 및 실험을 통하여 기존의 디지털 PID 제어기와 성능비교를 하였다. Fine 제어시 새로운 규칙 투입대신 Scaling factor를 변화시킴으로써 간단히 미세제어를 할수 있도록 하였으며 계통 파라미터 변동 및 외란 투입시에도 PID제어기보다 Robust한 특성을 얻도록 하였다.

비교에 사용된 디지털 PID제어기 이득은 샘플링 시간이 0.00139 초 일때, 위상여유 58° 와 이득여유가 13.5dB 을 만족하도록 선정하여 계산된 것으로 아래식 (11)과 같은 값이다.[1]

$$G_c(s) = K_p + K_i \frac{1}{s} + K_d s$$

$$K_p = 87, K_i = 7824, K_d = 0.285 \quad (11)$$

4-1. Scaling factor 선정

FLC 구성시에 웅답에 가장 민감한 영향을 주는 요인인 Scaling factor는 두단계로 나누어 적용하였다. Coarse 제어시에는 $E_c = 2800$, $CE_c = 25$, $CI_c = 0.9$ 로 선정하였고 Fine 제어시에는 $E_o(k) \times 0.1$, $CE_o(k) \times 0.1$, $\Delta U(k) \times 0.5$ 가 투입되도록 하였으며 이때의 웅답과 PID 웅답과의 비교를 그림 6.에 나타내었다. Scaling factor에 따른 웅답특성은 참고문헌 [5]에 잘 나타나 있다.

4-2. 파라미터 변동에 대한 영향

모터의 J, R, K_T 등의 변화에 대한 영향을 알아보기 위하여 2초 이후 파라미터를 변동 시킨 후 PID 제어기와 FLC 제어기를 비교하였으나 J 및 R 이 50 % 이상 변화할 때에도 두 제어기의 특성은 일정하게 유지됨을 알 수 있었고 토크 상수 K_T 가 30 % 변동시 PID에 비하여 FLC는 위상에 거의 변화가 없음을 그림 7.에서 알 수 있다.

4-3. 외란에 대한 영향

그림 8.에서는 2.5초 이후 $(1/J) \times T_L$ 의 크기를 변화시킨 응답으로 PID 제어기 특성보다 FLC 제어기 응답 특성이 외란에 대하여 더 Robust 함을 알 수 있다.

4-4. 실험 결과 검토

고속의 퍼지 추론을 위하여 TMS320C25로 구성된 제어기를 구현하고 규칙에 대한 look-up table을 사용하여 실험하였다. 그림 3.과 같이 Host IBM PC에 의하여 FLC 프로그램을 다운로드시키고 결과 모니터링 및 데이터 로깅을 할 수 있도록 하였다.

그림 9.와 그림 10.에서처럼 디지털 PID 제어기에 의한 응답과 FLC에 의한 응답이 큰 차이가 없으나 속도 및 위상오차에 대한 정상상태 도달 시간이 개선될 수 있음을 알 수 있고 좀더 최적의 scaling factor 결정 방법이 제시 된다면 특성향상이 좀 더 될 것으로 보인다. 결과 그림에서 약간의 리플이 발생하고 있으나 이는 look-up table 및 12 Bit DAC의 양자화 오차, 헤드 드럼의 FG 패턴의 부정확성에 의한 것으로 사려되며, 여러가지 필터를 사용하면 쉽게 제거될 수 있을 것이다. 또한 참고로 기존의 상품화된 VCR의 속도 및 위상 특성 응답은 그림 11.과 같다.

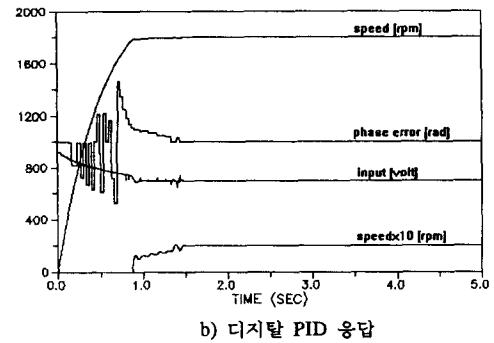
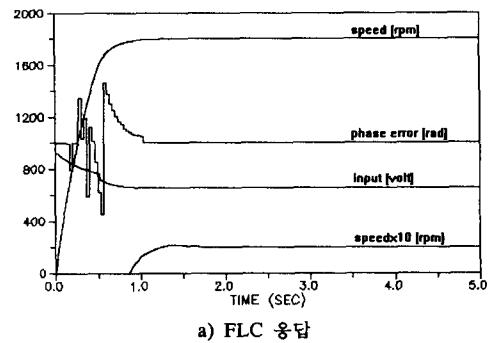


그림 6. FLC 와 디지털 PID 의 응답 비교

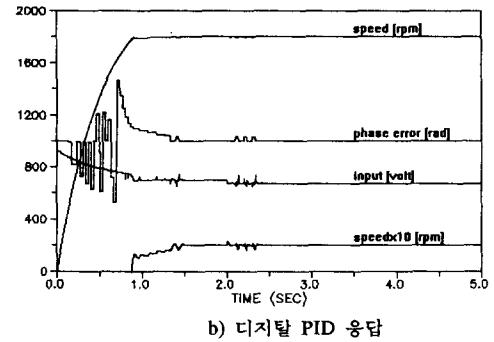
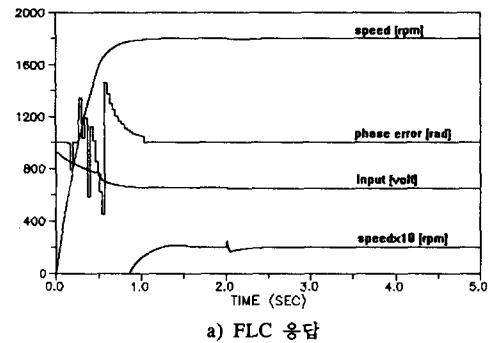
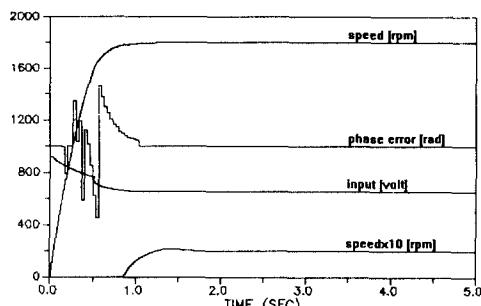
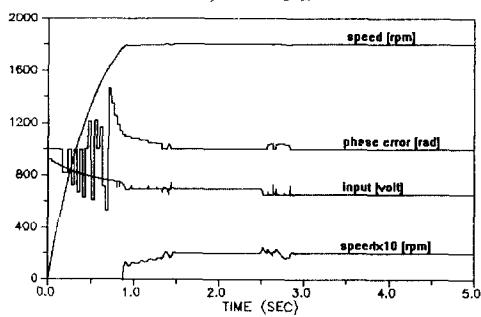


그림 7. 파라미터 변동시 응답 비교

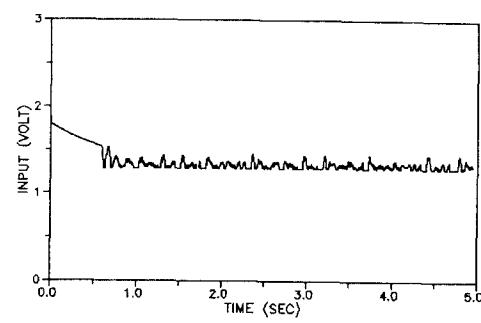


a) FLC 응답



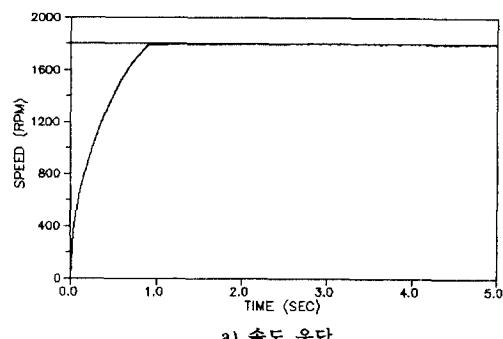
b) 디지털 PID 응답

그림 8. 부하 변동시 응답 비교

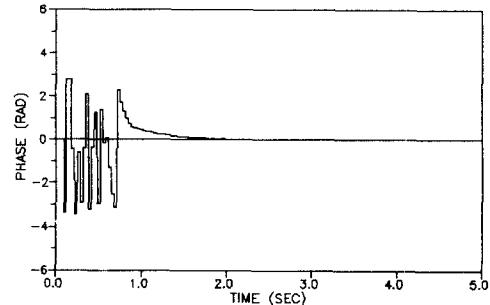


c) 제어 입력(전압)

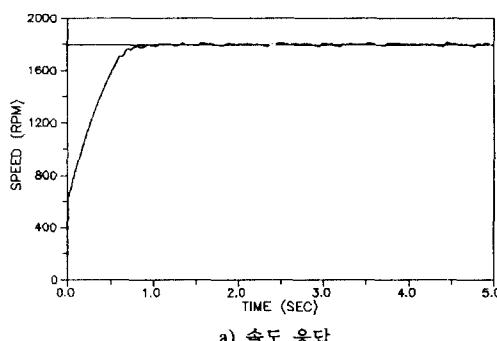
그림 9. FLC 에 의한 실험 결과



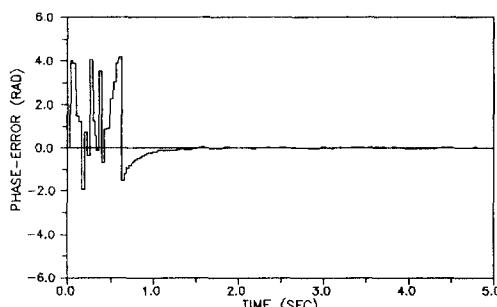
a) 속도 응답



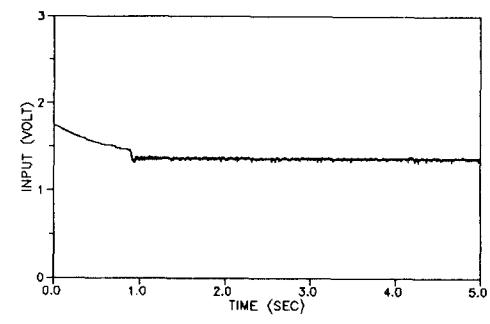
b) 위상 응답



a) 속도 응답



b) 위상 응답



c) 제어 입력(전압)

그림 10. 디지털 PID 에 의한 실험 결과

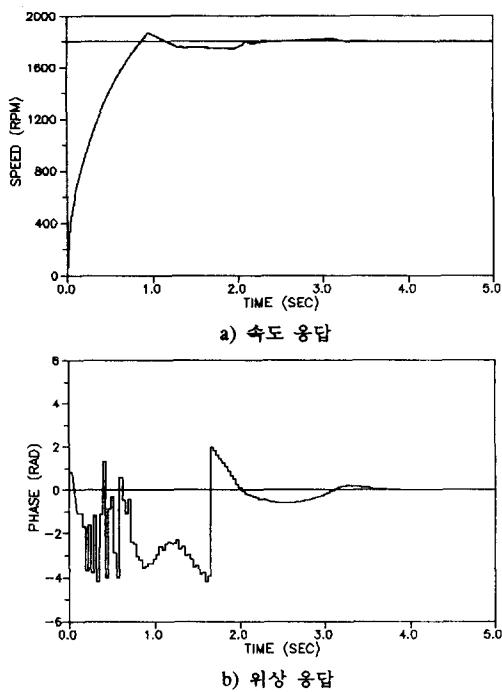


그림 11. 기존 VCR 시스템 응답

5. 결 론

이상과 같이 퍼지이론에 의한 FLC를 구성하고 운전증 규칙을 변경하는 대신 Scaling factor를 조절함으로써 응답특성 및 Robust 특성을 개선하도록 하는 연구를 하였다. 또한 TMS320C25에 의한 제어기를 구성하여 가정용 VCR에 사용된 헤드드럼 모터의 속도 및 위상 제어에 적용함으로써 성능향상 효과를 확인하였다. 따라서 본 논문에서 제안된 알고리즘을 사용함으로써 기존의 디지털 제어기법에 의한 것보다 좋은 VCR 화상특성을 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 앞으로 퍼지추론 알고리즘을 고속으로 처리할 수 있도록 퍼지 추론보드나 전용 퍼지 Chip에 의한 제어기 설계로 보다 향상된 제어성능을 얻도록 하는 연구가 이루어져야 할 것이다.

[참고 문헌]

1. G.T.Park, S.L.Lee et al., "Design of Digital Servo System for Drum Motor in Home VCR ", 1991, IECON
2. C.C.Lee, "Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller - Part I,II ", IEEE Trans.Syst.Man Cybern., vol 20,no.2,pp.404-435, MAR/APR, 1990.
3. Y.F.Li, "Development of Fuzzy Algorithms for Servo Systems ", IEEE Control Syst. Mag. vol.9, no.3, pp.65-72, APR, 1989.
4. P.J.MacVicar-Whelan, "Fuzzy Sets for Man-machine Intersection ", Int.J.Man-Machine Studies, vol.8, pp.687-697, NOV. 1967.
5. T.J.Procyk, E.H.Mamdani , "A Linguistic Self-Organizing Process Controller ", Automatica vol.15, pp.15-30, 1979.