

## AC Servo Motor와 Ball screw를 이용한 정밀 위치제어시스템의 기계적 특성 분석 및 개선

고수창\* · 진경복†

\*한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부대학원, †한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부

### The Mechanical Characteristic Analysis and Improvement of Precision Position Control System with AC Servo Motor and Ball Screw

Su Chang Ko\* and Kyoung Bog Jin†

\*KUTE School of Mechatronics Engineering, †KUTE School of Mechatronics Engineering

#### ABSTRACT

Effect of coulomb friction and backlash on the single loop position control has been studied for the precision position control. We have showed the limit cycle on the single loop system which used a ball screw that had the backlash. Also, we have made an inner loop with a classical velocity and torque controller which was forcing the current of d axis to be zero by using a permanent-magnet synchronous motor and composed the outer loop with linear encoder for sensing a position of the loader. Also, we have used least squares fit(LSF) observer for reducing noise when we got velocity from position outputs. We have shown a good result by using the dual loop through simulation and experiment.

**Key Words :** Backlash, Dual loop, PMSM, Limit Cycle

#### 1. 서 론

정밀 위치제어 시스템은 첨단 산업 분야에서 필수적으로 사용되고 있으며, 특히 반도체 생산 장비 및 측정장비, 나노 공학 등 많은 분야에서 높은 위치 정밀도와 강인한 시스템의 특성을 가진 이송 시스템이 요구되고 있다.

PMSM(Permanent-Magnet Synchronous Motor)는 구동 시스템이 복잡하고 제어하기 어렵다는 단점이 있지만, 같은 크기의 직류 모터(DC Motor)에 비해 더 큰 출력을 낼 수 있고 방열 특성이 우수하여 수명이 길다는 장점이 있어 현재 많은 응용 분야에서 널리 사용되고 있다.

직선 운동 기구를 구성하기 위해서 구현이 쉽고 저가의 형태로 만들기 위해서 모터와 볼 스크류(Ball screw)를 이용한 경우가 많다. 그러나 직선 운동 시 나

사면과 베드 접촉면에서의 마찰저항과 볼 스크류의 백래쉬(Backlash)가 존재하게 된다.

백래쉬가 제어특성에 미치는 부정적인 영향을 극복하기 위한 연구 발표가 있어 왔으며 장경선, 김옥[1]은 백래쉬가 시스템에 미치는 영향을 해석하였고 Helou-vry[2] 등은 마찰에 대한 분석과 시스템에 미치는 영향을 제시한 바 있다.

모터와 스테이지간에 백래쉬가 존재 하는 경우, 미소한 모터의 동작에는 불감대가 형성되어 리니어 엔코더(Linear Encoder)만으로 측정되지 않는다. 따라서 백래쉬로 인한 제한 진동(Limit Cycle)을 만들 수 있어 정밀한 위치 제어가 불가능하다. 반대로 로터리 엔코더(Rotary Encoder)만을 사용할 경우 백래쉬 측정 자체가 불가능하여 역시 정밀한 제어가 불가능하다. 또한 LSF observer를 통하여 측정 노이즈를 저감하면서 실시간으로 상태 변수를 추정하여 제어에 이용할 수 있다.

본 논문에서는 PMSM을 제어하기 위해서 속도/토크 제어기를 구성하였고 백래쉬를 보상하기 위해서 이

†E-mail : kbjin@kut.ac.kr

중 루프(Dual loop)를 구성하여 개선 방안을 모색하였고 수치적 시뮬레이션을 통하여 백래쉬와 마찰을 포함한 시스템에서 미치는 영향을 보이고 이중 루프 시스템의 타당성을 보인다.

## 2. 시스템의 수학적 모델링

전체 위치제어 시스템의 블록선도는 Fig. 1과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 내부 루프는 전류와 모터의 회전각을 피드백 받고 외부 루프는 스테이지의 위치를 피드백 받는 이중 루프를 구성하였다.

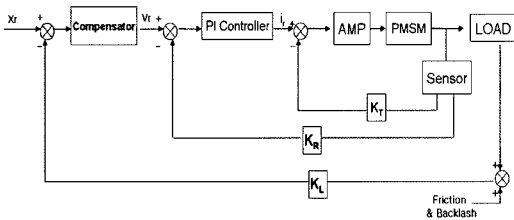


Fig. 1. Block Diagram of the System.

### 2.1. PMSM과 스테이지의 모델링

3상 PMSM의 영구자석은 회전자의 여자를 발생시키기 위해서 사용한다. PMSM의 동작은 축위치센서로부터 회전자 위치 정보에 기초하고 전동기의 상권선은 구동 토크와 속도를 발생함에 따라 여자된다.

PMSM의 전압방정식은 식(1)과 같다[3].

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{aa} & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ba} & L_{bb} & M_{bc} \\ M_{ca} & M_{cb} & M_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_a \\ \dot{i}_b \\ \dot{i}_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서,  $V_a, V_b, V_c$ 는 각 상에 대한 모터의 상전압,  $i_a, i_b, i_c$ 는 모터의 상전류,  $e_a, e_b, e_c$ 는 모터의 역기전력,  $R_a, R_b, R_c$ 는 각 상에 대한 코일 저항,  $L_{aa}, L_{bb}, L_{cc}$ 는 각 상에 대한 인덕턴스,  $M_{ab}, M_{ac}, M_{ba}, M_{bc}, M_{ca}, M_{cb}$ 는 각 코일 사이의 상호 인덕턴스이다.

위 식(1)에서 보는 바와 같이 전동기가 정지 하고 있는 경우를 제외하고는 시변 미분방정 식으로 나타나게 된다. 따라서 3상 교류 전동기의 a, b, c 상을 적절한 좌표변환을 통하여 d, q, n의 세 개의 직교 좌표계상의 변수로 변환 될 수 있다. 통상 직축(d axis)은 여자 자속(Excitation Flux)이 존재하는 축이며 횡축(q axis)은 그와 직각 을 이루는 축으로 회전 자속이 정방향으로 회전 할 때 d축에 비해 회전할 방향에 앞서서 위치

한다. 증성축(n axis)은 회전자계의 형성에는 기여 하지 않는다.

다음 식(2)는 d, q 축의 전류 벡터로 고정자 상전류  $i_a, i_b, i_c$ 와 위치각  $\theta$ 로 좌표 변환된 식이다[2][4].

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \cos(p\theta) & \sin(p\theta) \\ -\sin(p\theta) & \cos(p\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서  $i_d, i_q$ 은 각각 d, q축 전류,  $p$ 는 극의 쌍수 (Pole pairs)이다.

또한, 회전자 프레임에 대한 전압방정식은 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} v_d &= R_s \cdot i_d + L_d \cdot \frac{di_d}{dt} - p \cdot L_q \cdot \omega_r \cdot i_q \\ &= R_s \cdot i_d + L_d \cdot \frac{di_d}{dt} - p \cdot \sigma \cdot L_d \cdot \omega_r \cdot i_q \\ v_q &= R_s \cdot i_q + L_q \cdot \frac{di_q}{dt} - p \cdot L_d \cdot \omega_r \cdot i_d + p \cdot \omega_r \cdot \Phi \\ &= R_s \cdot i_q + \sigma \cdot L_d \cdot \frac{di_q}{dt} - p \cdot L_d \cdot \omega_r \cdot i_d + p \cdot \omega_r \cdot \Phi \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,  $v_d, v_q$ 는 d, q 축 전압,  $R_s$  회전자 저항,  $L_q, L_d$ 는 d, q 축 인덕턴스,  $\omega_r$ 는 회전자 각속도,  $\Phi$ 자속이다.

$$\begin{aligned} T &= p \cdot [(L_d - L_q) \cdot i_d + \Phi] \cdot i_q \\ &= p \cdot [\Phi \cdot (\sigma - 1) \cdot L_d \cdot i_d] \cdot i_q \end{aligned} \quad (4)$$

Table 1. Parameters of PMSM.

Parameter	Values	Unit
R	1.07	ohm
$\Phi$	0.17	Wb
$p$	4	Pole pairs
$L_{d,q}$	9.3	mH

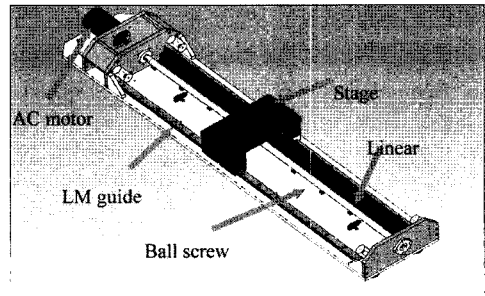


Fig. 2. Stage modeling.

PMSM의 토크 방정식은 식(4)와 같다. 토크의 효율을 좋게 하기 위해서는 돌극비(Saliency ratio)가 1과 같거나 커야 하며 일반적인 토크 컨트롤러는 동손 손실(Copper losses)을 최소화 하기 위해서 id를 0이 되도록 한다[4]-[9]. 또한 토크 효율을 더 좋게 하기 위해 d축 전류를 음의 값으로 만드는 방법도 제안되었다[4].

모터로부터 토크 입력을 받는 스테이지의 운동 방정식은 식(5)와 같다.

$$J\ddot{\theta}(t) + B\dot{\theta}(t) = T_m - T_f \quad (5)$$

여기서  $J$ 는 모터, 볼스크류, 스테이지를 고려한 상당 회전 관성모멘트이며,  $B$ 는 로더의 마찰 감쇠 계수,  $T_m$ 은 모터의 출력토크,  $T_f$ 은 외부 마찰이다.

### 2.2. 마찰과 백래쉬의 영향

스테이지의 마찰을 모델링하면 정지마찰(Static friction), 쿨롱마찰(Coulomb striction), 점성 마찰(Viscous Friction)로 구분할 수 있다. 정지 마찰 영역에서는 아주 작은 움직임에서는 임계 값에 이르기 전까지 마치 스프링과 같은 성질을 보인다. 하지만 본 논문에서는 백래쉬의 영향을 살펴보기 위하여 움직임을 방해하는 힘으로 나 타내어 수평력으로 간주한다. 그리고 임계값을 지나 물체가 움직이기 시작하면 속도가 커짐에 따라 속도에 비례하게 되는 점성마찰을 일으킨다.

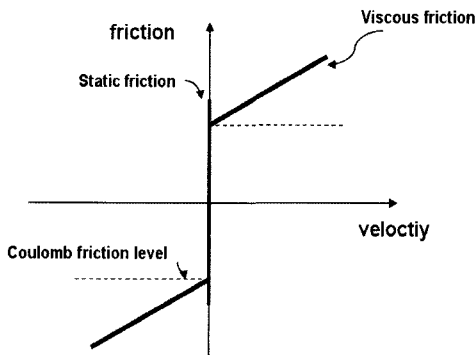


Fig. 3. Friction Model.

백래쉬는 모터의 회전방향이 바뀌는 때 스크류와 너트가 순간 접촉이 이탈되어 다음 너트에 접촉 할 때까지 불감대 영역을 발생시킨다. 만약 그 위치 안에 목표값을 가질 때 단일 루프를 형성한 시스템은 목표 위치를 찾지 못하고 제한 진동을 발생시킨다.

모터의 유효 회전각을  $\theta_e(t)$ 로 하면

$$\dot{\theta}_e(t) = \begin{cases} \dot{\theta}(t) & \text{스크류와 너트 접촉시} \\ 0 & \text{스크류와 너트 비접촉시} \end{cases} \quad (6)$$

스크류와 너트 접촉면, 베드와 블록의 접촉 면에서 발생하는 마찰 토크,  $T_f$ 를 쿨롱 마찰 이라고 가정하면 식(7)과 같이 쓸 수 있다.

$$T_f(t) = \begin{cases} q_f \dot{\theta}_e(t) > 0 \\ 0 & \dot{\theta}_e(t) = 0 \\ -q_f \dot{\theta}_e(t) < 0 \end{cases} \quad (7)$$

식(5), (6)과 식(7)에 의해 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} J\ddot{\theta}_e(t) + B\dot{\theta}_e(t) &= q \\ \theta(0) = \dot{\theta}(0) &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

이 식으로부터 불감대 시간  $t_b$ 와 재 접촉 시 모터 각속도  $\dot{\theta}_c$ 에 대한 아래의 결과를 얻을 수 있다[1].

$$\dot{\theta}_c = \frac{q}{B}(1 - e^{-Bt_b/J}) \quad (10)$$

$$\theta_b = \frac{q}{B}\left(t_b + \frac{J}{B}e^{-Bt_b/J}\right) - \frac{qJ}{B^2} \quad (11)$$

만약 백래쉬 각  $\theta_b$ 가 주어지면 식(11)으로부터  $t_b$ 를 얻으며, 식(10)으로부터 각속도  $\dot{\theta}_c$ 를 얻는다. 이와 같은 결과로부터 Fig. 4와 같은 불 력선도를 얻는다.

### 2.3. 제어기의 구성

PMSM을 제어하기 위한 속도/토크 제어기를 구성하기 위해 전류와 회전자의 위치각을 되 먹임 받고 지령 속도를 PI 제어기를 통하여 받아 속도를 제어하는 내부 루프를 구성하고 스테 이지 부분에서 위치를 측정하여 피드백 받아 보상테이블을 통해 위치 보상을 하였다.

위치 대 목표 속도로 구성된 보상 테이블은 제어 목표 값으로 이용 되는 기준 궤적이 되어야 한다. 이는 컨트롤러의 매 샘플링 (sampling) 마다 목표치로 참조 되는 점들의 집합으로 구동 프로파일이라고도 불린다. 일반적으로 사다리꼴 모양의 속도 프로파일을 많이 사용하지만 종 모양의 프로파일을 사용하면 더욱 좋은 결과를 얻을 수 있다. 구동 프로 파일에 따라 다이내믹 에러(Dynamic error)는 물론이고 정상상태오차 (Settling error)가 큰 영향을 받으므로 시스템에 따라 적절한 프로파일을 설계하는 것은 중요하다.

위치에 대한 속도 프로파일을 만들기 위해서 3차 방정식을 이용하였으며, 5G이상의 초고속 서보 등에는 고성능 7차식으로 속도프로파일을 설계 하기도 한다.

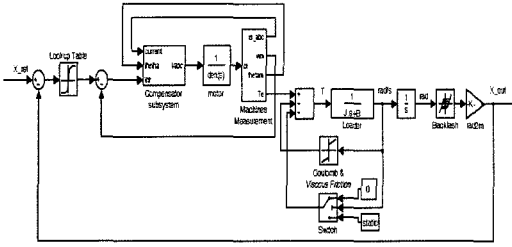


Fig. 4. block diagram of the position control system including Static, Coulomb Friction and Backlash.

2.4. 상태관측기 설계

상태관측기로서 LSF Observer[9]를 사용하여 센서로부터 직접적으로 데이터를 얻어 상태 변수를 추정하고 동시에 노이즈 저감 효과를 기대할 수 있다.

$t_k$  시간에 센서로부터 얻은 위치방정식을 다음 식(12)과 같이 가정한다.

$$x_k = c_0 + c_1 t_k + c_2 t_k^2 + c_3 t_k^3 + \dots + c_N t_k^N \quad (12)$$

M개의 데이터를 선택하여 방정식을 다시 쓰면  $K \leftrightarrow M, K-1 \leftrightarrow M-1, \dots, K-M+1 \leftrightarrow 1$ 와 같이 바로 맵핑될 수 있다. 위치다항식을 다시 나타 내면 다음 식(13)과 같다.

$$x = Ac \quad (13)$$

여기서,

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_M \end{bmatrix}, c = \begin{bmatrix} c_0 \\ c_1 \\ \vdots \\ c_M \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & \dots & 1^N \\ 1 & 2 & 4 & 8 & \dots & 2^N \\ 1 & 3 & 9 & 27 & \dots & 3^N \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & M & M^2 & M^2 & \dots & M^N \end{bmatrix}$$

속도항을 유도하기 위하여 식(12)를 미분하면 식(14)와 같다.

$$\frac{dx_M}{dt} = \sum_{i=1}^M c(i) t^{i-1} \quad (14)$$

여기서,

$$\frac{dx_M}{dt} = q^T A^+ x \quad (15)$$

여기서,

$$\frac{dx_M}{dt} = \sum_{i=1}^M h_i x_{K-M+i} \quad (16)$$

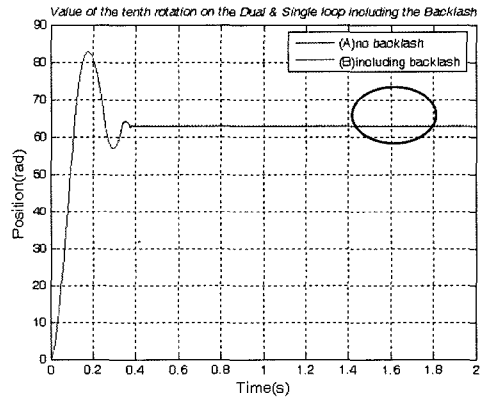
여기서,  $h^T = q^T A^+$

$h^T$ 는 오프라인 상에서 계산되기 때문에 특별히 프로그

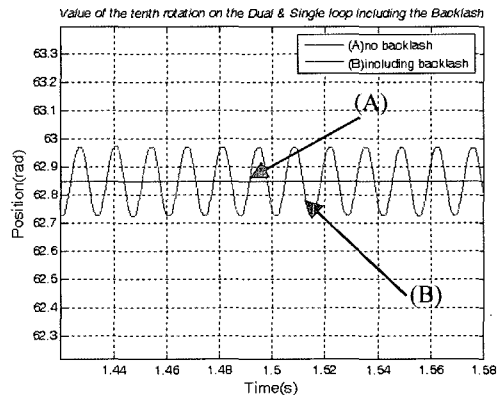
래밍하지 않아도 되며 계산된 값만 넣어 주면 된다. 실험적으로 1차 다항식을 선택 하였을 때도 좋은 결과를 얻을 수 있으며 선택 데이터 개수를 늘이면 노이즈 저감 효과가 더 커지지만 페이즈 딜레이(phase delay)때문에 한계가 있다.

3. 시뮬레이션 및 실험 결과

백래쉬의 영향을 알기 위해서 같은 조건하 에서 단일 루프와 이중 루프에 각각 백래쉬만을 추가하였을 경우 Fig. 5에서 볼 수 있듯이 단일 루프 만으로 시스템을 만들었을 시 제한 진동의 진폭 0.26 rad, 주파수 142.85Hz을 발생 시키는 것을 볼 수 있었다. 이와는 달리 Fig. 6에서 볼 수 있듯이 이중 루프를 구성하였을 경우 진폭 0.02rad, 주파수 5.5Hz로 백래쉬의 영향이 90% 정도 줄어드는 것을 볼 수 있다. 제어 입력에 대한 제한 진동의 진폭은 Fig. 7에서 볼 수 있듯이 제어

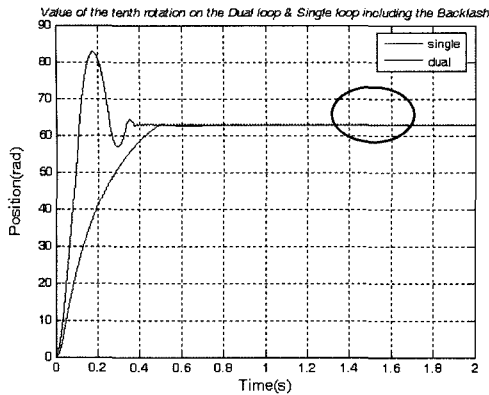


(a) Overall result

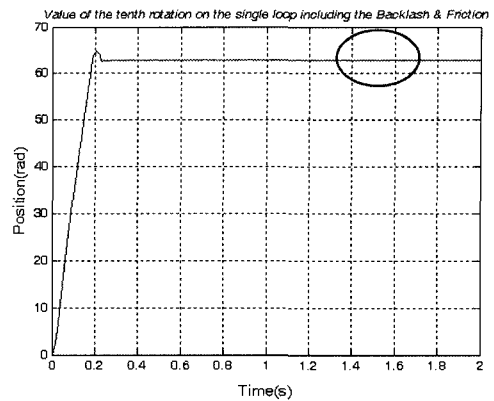


(b) Enlarged result of a part in (a)

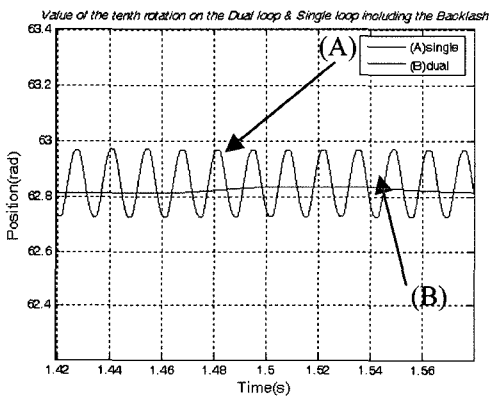
Fig. 5. Values of the single loop simulation including backlash and no backlash.



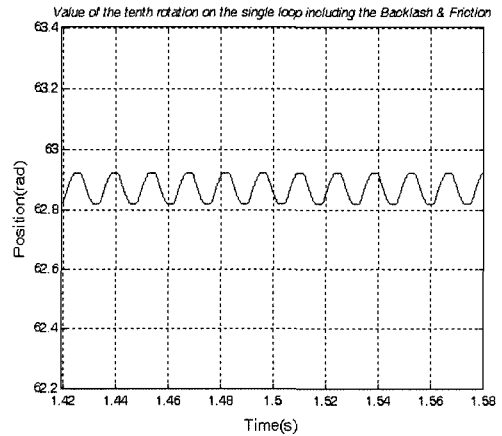
(a) Overall result



(a) Overall result



(b) Enlarged result of a part in (a)



(b) Enlarged result of a part in (a)

Fig. 6. Values of the single loop and the Dual loop simulations including backlash when motor respectively rotated 10 revolutions(62.8rad).

Fig. 8. Values of the single loop including the backlash and the friction (Target position reference 62.8rad).

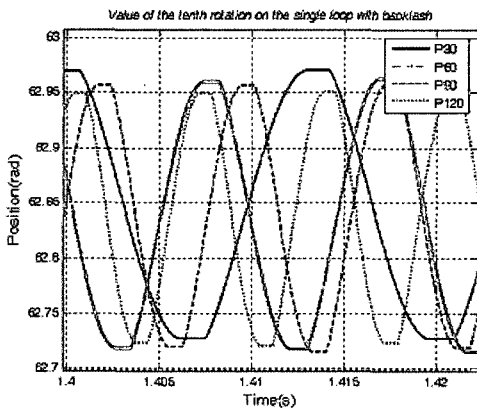


Fig. 7. Values of single loop simulation including backlash according to control gain.

입력 크기에 반비례하여 증가 한다.

루프에 마찰을 추가하였을 경우 Fig. 8에서 마찰의

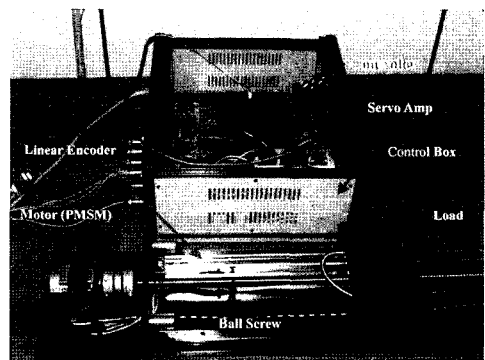
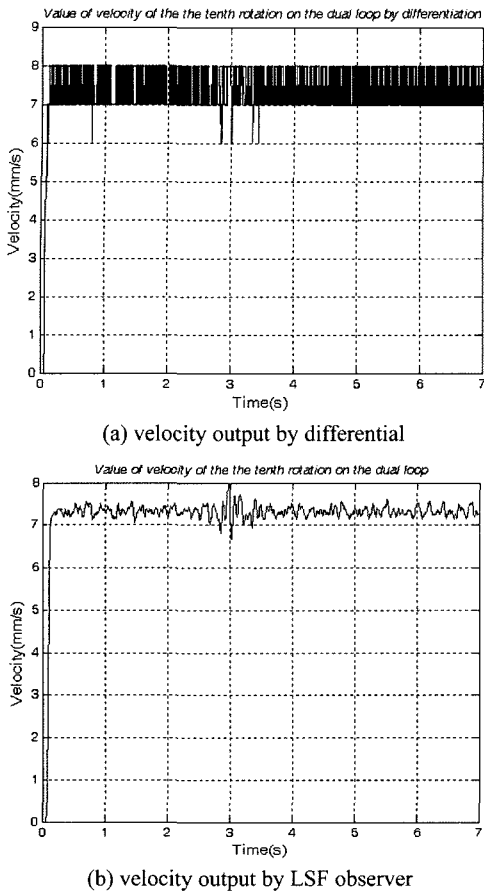


Fig. 9. Precision position control system

영향으로 오버 슈트(over shoot)가 현저히 줄어들었으며 정착 시간(settling time)이 감소 하였지만 백래쉬의 영향으로 리미트 사이클은 그대로 남아 있는 것을 볼 수 있다. 또한 실제 실험장치를 Fig. 9와 같이 구성하



**Fig. 10.** velocity output by differential and LSF observer (sampling time: 5 ms, reference velocity 7.3 mm/s, target position: 50 mm)

여 실험데이터를 얻은 결과는 Fig. 10과 같다. 위 결과는 매 샘플링 타임(Sampling time)마다 10개의 데이터를 선택하여 LSF observer를 통해 얻은 데이터이며 측정노이즈 저감 효과를 확인 할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 실제 현장에서 많이 사용 되고 있는 AC 서보모터(PMSM)를 이용 하여 속도 /토크 컨트럴 할 수 있는 내부 루프를 구성하고 볼 스크류를 이용한 선형 스테이지의 위치 값을 측정하여 제어에 이용하는 이중 루프를 구성 하여 정밀 위치 제어 시스템을 구성하였다. 또 한 PMSM의 특성과 백래쉬와 마찰에 대

해서 분석 하여 시스템에 그 미치는 영향에 대하여 분석 하였고 수치적 시뮬레이션으로 보였다. 선형스테이지 시스템에 LSF observer를 적용하여 실시간으로 속도추정과 함께 노이즈 저감효과 와 함께 시스템에 적용할 수 있음을 보였다.

#### 참고문헌

1. K. S. Chang, O. H. Kim, "Characteristics of ON-OFF Position Control for a Linear Motion System under the Influence of Coulomb Friction and Backlash." *Journal of the KSME*, vol.7, no. 3, pp. 645-651, 1993.
2. Armstrong-Helouvy, B. Dupont, P. De Wit, C.C. "A survey of models, analysis tools and compensation methods for the control of machines with friction," *the journal of IFAC, the International Federation of Automatic Control*, v.30 no.7, 1994, pp.1083-1138.
3. P. Pillay and R. Krishnan, "Modeling, simulation and analysis of permanent magnet motor drives, part 1: the permanent-magnet synchronous motor drive," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 25, pp. 265-273, Mar./Apr. 1989.
4. Grenier, D. Dessaint, L.-A. Akhrif, O. Bon nassieux, Y. Le Pioufle, B "Expe rimental nonlinear torque control of a permanent-magnet synchronous motor using saliency," *IEEE Trans. Ind. Electronics Society*, v. 44 no. 5, 1997, pp.680-687.
5. Y. J. Lee, Y. J. Yoon, Y. H. Kim, and M. H. Lee, "A Study on the Sensorless PMSM Control using the Superposition Theory," *International Journal of the KSPE* vol. 4, no. 2, pp. 5-12.
6. B. Le Pioufle, "Comparison of speed nonlinear control strategies for the synchronous motors," *Elec. Mach. Power Syst.*, vol. 21, pp. 151-169, 1993.
7. A. Kaddouri, O. Akhrif, H. Le Huy, and M, Ghribi, "Nonlinear feedback control of permanent magnet synchronous motors," in *Proc. 1994 Canadian Conf. Electrical and Computer Engineering*, Halifax, N.S., Canada, Sept. 25-28, 1994, pp. 77-80.
8. Qian. Xin, Wang. Youyi "Motion control of a linear brushless DC motor drive system with nonlinear friction compensation," *Power System Technology*, 2004. *PowerCon 2004. 2004 International Conference on*, 2004 v.2, 2004, pp.1276-1281.
9. Yasuhiko Dote, "Servo Motor and Motion Control Using Digital Signal Processors," Prentice Hall, 1990.