

## 퍼지마찰력보상기를 이용한 정밀위치제어에 관한 연구

· 윤 승 환, 양 상 식  
아주대학교 전기전자공학부 ·

### A Study on Precision Positioning Control using a Fuzzy Friction Compensation

· S. H. Yun, S. S. Yang  
School of electrical and electronic engineering  
Ajou University

**Abstract** For the precision positioning and tracking control, the proper friction compensation is essential. The friction causes steady state error. The friction compensation based on the velocity and the controlling input or the desired velocity provides limited performance if the compensation value is fixed. In this paper, a friction compensation scheme using a fuzzy logic is proposed. The friction compensation amount is adjusted depending on the velocity and controlling input. The proposed fuzzy friction compensator with a pole-assignment controller is implemented in a linear positioning system. To illustrate the effectiveness of this scheme, computer simulations and experiments are carried out for the cases of no friction compensation, the proposed fuzzy friction compensation, and another friction compensation scheme based on velocity and control input, and the results are compared with each other.

#### 1. 서 론

전자부품의 소형화와 반도체의 고집적화에 따라 조립 및 검사시 정밀 위치 제어시스템이 필요하다. 이러한 정밀가공을 위해서는 가공기기의 위치 결정 정밀도가 개선되어야 할 요소이다. 정밀기기의 작동에서 위치오차를 발생시키는 요소로서 기계시스템의 운동부에서 발생하는 마찰력이 가장 큰 원인이 된다. 이러한 영향을 제거하기 위해 마찰력의 해석 및 모델링을 위해 많은 연구들이 진행되어져 왔다. Armstrong 등은 마찰력의 정역학모델을 제안하였으며[1-2], Canudas 등은 마찰력의 동역학모델을 제안하였다[3]. 마찰력은 운동의 방향, 속도, 위치, 부하의 변동에 의해 영향을 받으며 시변요소를 포함하고 있다[1]. 정밀위치제어 시스템에서 고정된 모델에 근거하여 마찰력 보상량을 결정하면 시변요소를 포함하는 마찰력을 충분히 보상하지 못하므로 위치오차가 발생한다. 마찰력을 추정하여 보상량을 결정하면 좋은 성능을 기대할 수는 있지만 추정과정의 계산량 때문에 실시간 제어에는 어려움이 따른다. 계산량을 줄이기 위하여 퍼지마찰력과 플러프마찰

력 모델에 근거하여 속도와 제어신호의 부호로 마찰력 보상량을 결정하는 연구가 진행되었다[3]. 그러나 이러한 방법에서는 속도의 크기와 시변요소가 고려되지 않기 때문에 오차가 발생할 수 있다. 퍼지제어기는 복잡한 형태를 갖는 제어대상 시스템에 대해 수학적 모델링이 필요없고 비선형 시스템에 적용시 효과적이다[4]. 또한 전문가의 경험적 지식으로 제어규칙을 언어적 형식으로 적절히 표현함으로써 간단히 제어규칙을 설정할 수 있는 장점이 있다. 퍼지제어기는 제어대상의 파라미터 변경과 외란에도 강인한 특성을 보여 시간과 위치, 속도 등에 대하여 연속적으로 변화하는 마찰력을 보상하는데 적합하다.

마찰력 보상에 필요한 입력신호로는 속도, 위치오차, 제어입력 등 중에서 여러가지 조합이 있을수 있으나, 본 논문에서는 속도와 제어입력에 근거한 마찰력 보상기법[5]을 채택하여, 이 기법에 바탕을 두어 퍼지 마찰력 보상기법을 제안하고 시뮬레이션과 실험을 통하여 제안한 퍼지마찰력 보상기의 성능을 확인한다.

#### 2. 위치제어 시스템

본 연구에 사용한 전체 위치제어시스템의 블록도를 그림 1에 나타내었다. 제어대상 플랜트는 Sanyo의 UGTMEM-01MB4 회전모터와 lead screw를 이용한 선형 위치결정기구이다. 그림 1에서 PAC는 3절에서 언급될 극배치제어기(Pole-Assignment Controller)를 나타내며, FFC는 4절에서 언급될 퍼지마찰력보상기(Fuzzy Friction Compensator)이다. 그림 1의 시스템에서 모터의 전기자 인덕턴스 값은 작으므로 무시하고 모터입력전압,  $u$ 로 부터 선형속도,  $v$ 까지의 플랜트의 전달함수,  $G_n(s)$ 를 구하면

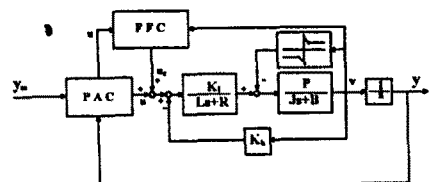


그림 1 전체 위치제어 시스템의 블록도.

$$G_c(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{PK_i}{Ks + (RB + K_i K_s)} = \frac{K}{s+1} \quad (1)$$

이다. 여기서,  $K$ 는 토크상수,  $L$ 은 전기자 인덕턴스,  $R$ 은 전기자 저항,  $J$ 는 관성모멘트,  $B$ 는 점성마찰계수,  $K_b$ 는 역기전력,  $P$ 는 스크류 피치이고,

$$r = \frac{RJ}{RB + K_i K_s} \quad (2)$$

$$K = P \frac{K}{RB + K_i K_s}$$

이다. 모터의 제원만으로 운동부 전체 관성모멘트와 점성마찰계수를 알 수 없기 때문에 플랜트가 식(1)과 같은 전달함수를 갖는다고 가정하고, 계단응답실험으로부터 시상수,  $r$ 와 이득,  $K$ 를 구한다. 실험에서 구한  $r$ ,  $K$ 와 모터 제원의  $R$ ,  $K_b$ ,  $K_i$  등을 이용하여  $B$ 와  $J$ 값을 구한다. 식(2)로부터

$$B = \frac{1}{R} \left( \frac{PK_i}{K} - K_i K_s \right) \quad (3)$$

$$J = \frac{r}{R} (RB + K_i K_s)$$

이다. 그림 2는 시상수를 실험적으로 구하기 위하여 전압 10 V의 계단입력에 대한 위치결정기구의 속도응답을 나타낸 것이다. 정상상태 속도의 63.1%가 되는 시간이 시상수이므로 계단응답으로부터 얻은 위치결정기구의 시상수는 10.7 ms이다. 초기에 약 25 ms의 응답지연이 있는 것은 마찰력때문이다. 그림 3은 여러 가지 크기의 계단 입력전압,  $U_i$ 에 대한 속도응답을 측정하여 입력전압에 대한 정상상태 속도를 나타낸 것이다. 정상상태 속도,  $v_{ss}$ 는

$$\begin{aligned} v_{ss} &= \lim_{t \rightarrow \infty} v(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s G_c(s) U(s) \\ &= \lim_{s \rightarrow 0} \frac{K}{s+1} \frac{U_i}{s} \\ &= KU_i \end{aligned} \quad (4)$$

이다. 그리고 물통 마찰력에 해당하는 전압,  $U_k$ 를 고려할 경우 입력전압과 정상상태속도의 관계식은

$$v_{ss} = K(U_i - U_k) \quad (5)$$

로 주어진다. 즉, 그림 3에서 전압축과의 교점이 물통 마찰력에 해당하는 전압,  $U_k$ 이고 그래프의 기울기가  $K$ 에 해당한다. 실험

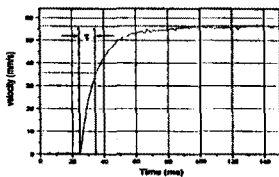


그림 2 입력전압 10V에 대한 계단응답.

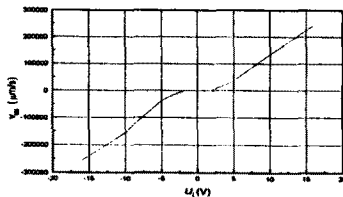


그림 3 정상상태 속도와 전압.

에서 구한  $K$ 는 17.45 mm/Vs이다. 정지마찰력에 해당하는 전압,  $U_k$ 는 모터에 전압을 가하여 움직이기 시작하는 때의 전압이다. 실험으로부터 구한  $U_k$ 는 1.8 V이다. 모터 전기부의 인덕턴스 유도 전압을 무시하고 계산한 정지마찰력,  $f_s$ 는  $2.57 \times 10^3$  Nm이다. 모터제원과 실험으로부터 구한 모터의 매개변수를 표 1에 나타내었다.

### 3. 극배치 제어기

본 연구에서는 극배치기법을 이용한 이산시간 위치제어기를 사용한다. 일반적으로 위치제어 시스템에는 비례제어, 혹은 비례미분제어를 사용한다. 그러나 이러한 방법은 제어기 동조에 어려움이 따른다. 극배치기법은 플랜트의 전달함수를 알고 있으면 전체 제어시스템의 극점이 원하는 곳에 위치하도록 제어기를 간단히 설계할 수 있는 장점이 있다. 선형요소만으로 구성된 시스템에서는 선형제어만으로도 정상상태오차를 없앨 수 있다. 그러나 실제의 기계시스템에는 마찰력이 존재하므로 선형제어만 행하면 정상상태오차가 발생한다. 일반적으로 비례미분제어에서 발생하는 정상상태오차를 없애기 위해 비례미분적분제어를 행하면 reset windup현상이 발생해서 위치제어시에는 만족스러운 성능을 기대하기 어렵다. 따라서 제어기는 극배치제어기로 결정하고 퍼지마찰력보상기를 통해 적절한 마찰력 보상량을 결정하여 제어기 출력에 더하여 제어한다. 위치제어를 위한 위치결정기구의 입력전압,  $u$ 와 출력변위,  $x$  사이의 연속시간 전달함수  $G(s)$ 는

$$G(s) = \frac{X(s)}{U(s)} = \frac{K}{s(s+1)} \quad (6)$$

이다. 전달함수  $G(s)$ 를 제어법칙의 계산을 위한 한 스텝 시간지연을 고려하여 이산시간으로 변환하면

$$G(q^{-1}) = \frac{q^{-2}B(q^{-1})}{A(q^{-1})} = \frac{q^{-2}(b_0 + b_1 q^{-1})}{1 + a_1 q^{-1} + a_2 q^{-2}} \quad (7)$$

여기서

$$a_1 = -(1+\rho), \quad a_2 = \rho$$

$$b_0 = K_1, \quad b_1 = K_1 z_1$$

$$\rho = e^{-T}, \quad K_1 = K(T - \rho(1-\rho))$$

$$z_1 = \frac{-T + K(1-\rho)}{T - \rho(1-\rho)}$$

이고,  $T$ 는 이산시간제어기의 샘플주기이다. 그림 4는 극배치제어기의 블록도이다. 전체제어시스템의 특성방정식은

$$A(q^{-1})S(q^{-1}) + q^{-1}B(q^{-1})R(q^{-1}) = D(q^{-1}) = 0 \quad (8)$$

매개변수명	단위	값
전기자 저항, $R$	$\Omega$	3.7
전기자 인덕턴스, $L$	mH	$0.9 \times 10^{-3}$
토크상수, $K_t$	Nm/A	$5.29 \times 10^{-3}$
역기전력상수, $K_b$	Vs/rad	$6.303 \times 10^{-2}$
관성모멘트, $J$	Kgm <sup>2</sup>	$1.639 \times 10^{-6}$
점성마찰계수, $B$	Kgm <sup>2</sup> /s · rad	$6.92 \times 10^{-4}$
정지마찰력, $f_s$	Nm	$2.57 \times 10^3$
동마찰력, $f_c$	Nm	$2.31 \times 10^{-1}$

표 1. 위치제어 시스템의 매개변수

이다. 이 때 다항식  $A$ 와  $B$ 의 차수를 고려하면[6][7],

$$\begin{aligned} D(q^{-1}) &= 1 + d_1q^{-1} + d_2q^{-2} \\ R(q^{-1}) &= r_0 + r_1q^{-1} \\ S(q^{-1}) &= 1 + s_1q^{-1} + s_2q^{-2} \end{aligned} \quad (9)$$

이 되며, 전체 제어 시스템이 원하는 고유값을 갖도록  $D(q^{-1})$ 를 정한다. 식(8)으로부터 미정계수법을 이용하여 다항식  $R(q^{-1})$ 과  $S(q^{-1})$ 의 계수를 정한다. 본 연구에서는 이산시간 제어시스템의 근이  $z=0.9$ 에 증근을 갖도록 한다. 그림 4에서  $y_m$ 은 사다리꼴 속도 지령을 적분한 위치지령이고, 제어입력,  $u(k)$ 는

$$\begin{aligned} u(k) &= y_m(k+2) + d_1y_m(k+1) + d_2y_m(k) \\ &\quad - r_0x(k) - r_1x(k-1) - s_1u(k-1) - s_2u(k-2) \end{aligned} \quad (10)$$

이 된다.

#### 4. 속도와 제어입력에 근거한 마찰력 보상

마찰력 보상 기법은 추정된 마찰력에 해당하는 보상량을 추가함으로써 시스템에 존재하는 마찰력을 상쇄시키는 방법이다. 이미 제안된 속도와 제어입력에 근거한 마찰력 보상기법은 마찰력을 실시간으로 정확히 추정할 필요가 없다는 장점이 있다[5]. 이 마찰력 보상기법을 사용하는 경우 제어기의 출력,  $u_c$ 는 다음과 같다.

$$u_c = u + u_f(u, v) \quad (11)$$

여기서  $u$ 는 제어기의 출력이고,  $u_f$ 는 다음의 식 (12)과 같이 비선형함수로 주어지는 마찰력 보상기의 출력이다[6].

$$u_f = \begin{cases} U_o^+ & \text{if } v \geq 0 \text{ and } u > 0 \\ U_u^+ & \text{if } v > 0 \text{ and } u \leq 0 \\ 0 & \text{if } v = 0 \text{ and } u = 0 \\ -U_u^- & \text{if } v < 0 \text{ and } u \geq 0 \\ -U_o^- & \text{if } v \leq 0 \text{ and } u < 0 \end{cases} \quad (12)$$

여기서  $U_o$ 와  $U_u$ 는 overcompensation과 undercompensation에 해당

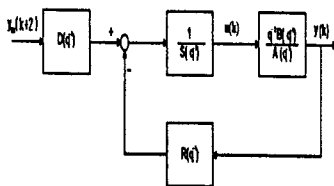


그림. 4 극배치제어의 블록도.

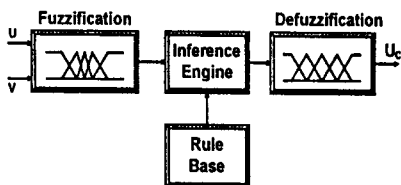


그림. 5 퍼지마찰력보상기의 구조.

하는 양의 값이며, 위첨자 '+'와 '-'는 운동 방향을 나타낸다.  $U_o^+$ 와  $U_u^+$ 는 양방향 모두 정지마찰력을 undercompensation하지 않을 정도의 큰 값이고  $U_u^-$ 와  $U_o^-$ 는 운동마찰력을 overcompensation하지 않을 정도의 작은 값이어야 한다.

#### 5. 퍼지 마찰력 보상기

일반적으로 퍼지제어기는 입력변수를 퍼지화하고 제어규칙에 의한 추론과정을 거쳐 비퍼지화를 통하여 제어신호를 계산한다. 그림 5는 퍼지 마찰력 보상기의 구조를 나타낸다. 입력 변수로는 속도와 제어입력을 사용한다. 속도에 대한 비선형성을 고려하기 위하여 속도를 입력변수로 선정한다. 제어입력은 시스템이 추정성능을 향상시키는 지표이므로 입력변수로 사용하여 위치오차를 줄이는데 이용한다. 본 연구에서는 각 입력변수에 대하여 5 가지 소속집합을 정한다. 따라서 25 가지의 추론규칙을 갖는다. 일반적으로 마찰력은 속도의 함수로 모델링한다[1]. 그림 6은 위치제어시스템에서의 마찰력 모델을 나타낸 것이다. 속도가 0일 때의 정지마찰력,  $f_s$ 가 가장 크고 일정속도 이상에서는 쿨롱마찰력,  $f_c$ 만 나타난다. 그리고 저속 부근에서는 속도가 증가함에 따라 마찰력의 크기가 작아지는 Stribeck 효과는 지수함수로 나타낸다. 그림 6에서  $f_s^+$ 와  $f_s^-$ 는 각각 속도가 양의 방향일 때의 정지마찰력과 쿨롱마찰력,  $f_c^+$ 와  $f_c^-$ 는 각각 속도가 음의 방향일 때의 정지마찰력과 쿨롱마찰력이다. 이러한 마찰력의 특성을 고려하여 속도소속함수를 설정한다. 제어입력은 각각 정지마찰력과 쿨롱마찰력에 해당하는 전압의 양으로 크기를 정한다.

그림 7는 속도, 제어입력, 마찰력 보상량의 소속함수를 나타낸 것이다. 소속함수를 나타내는 기호에서 P와 N은 각각 부호 (+), (-)를 나타내고, M과 L은 각각 medium과 large를 의미하며 ZE는 zero를 뜻한다. 그림 7 (a)에서 속도가 ZE인 부근을 작게 설정한 이유는 정지 마찰력이 속도가 아주 작은 부근에서 나타나기 때문이다. 마찬가지로 Stribeck효과가 나타나는 저속 부근을 PM, NM으로 설정하고 일정속도 이상은 PL, NL로 설정한다. 위치 정밀도를 높이기 위하여 제어입력에 대한 소속함수는 마찰력에 해당하는 양을 정한다. 마찰력 보상량의 소속함수는 모터의 특성 실험을 통하여 얻은  $U_o^+$ ,  $U_u^+$ ,  $U_u^-$ ,  $U_o^-$ 를 각각 NL, NM, PM, PL의 중심값으로 한다.

마찰력 보상을 위한 추론규칙은 4절의 속도와 제어입력에 근거한 마찰력 보상기법을 바탕으로 제어입력량을 정한다. 표 2는 마찰력 보상을 위한 퍼지추론 규칙을 나타낸다. 속도가 ZE의 경우에는 정

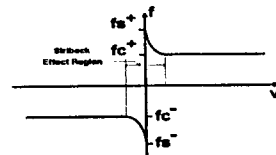


그림. 6 마찰력 모델.

지마찰력이 존재하므로 보상량을 크게 한다. Stribeck효과가 나타나는 저속의 속도영역 NM과 PM에서는 제어입력의 방향과는 무관하게 각가의 양을 속도의 방향과 동일하게 하고 보상량은 서로 반대 방향일 경우 플룸마찰력에 해당하는 양을 보상하게 하였으며, 제어입력이 ZE이면 속도의 방향과 동일한 방향으로 플룸마찰력의 양을 보상한다.

$$R_{ij}: \text{if } (v \text{ is } A_i) \text{ and } (u \text{ is } B_j) \text{ then } u_c \text{ is } C_{ij} \quad (13)$$

$i, j = 1, 2, \dots, 5$

여기서  $v$ 는 속도값,  $A_i$ 는 속도의 언어변수,  $u$ 는 제어입력값,  $B_j$ 는 제어입력 언어변수,  $u_c$ 는 마찰력 보상량,  $C_{ij}$ 는 보상량의 언어변수를 나타낸다. 두개의 입력 변수, 속도,  $v$ 와 제어입력,  $u$ 에 대하여 소속함수가 겹치는 부분이 존재하므로 매년, 최대 4 개의 제어규칙이 적용된다. 속도,  $v$ 가  $A_i$ 이고, 제어입력,  $u$ 가  $B_j$ 일때 출력  $C_{ij}$ 에 대한 귀속도는

$$\mu_{ij} = \min[\mu_{A_i}(v), \mu_{B_j}(u)] \quad (14)$$

이다. 퍼지추론을 거쳐서 출력,  $u_c$ 는 퍼지값이므로 비퍼지화를 통하여 물리적인 출력값을 결정한다. 본 연구에서는 무게중심법을 사용한다. 출력값,  $u_c$ 는

$$u_c = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot C_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (n \leq 4) \quad (15)$$

이다[4]. 여기서  $n$ 은 매 계산에서 적용되는 추론규칙의 수이다.

$\frac{u}{v}$	NL	NM	ZE	PM	PL
NL	NL	NL	NM	NM	NM
NM	NL	NL	NM	NM	NM
ZE	NL	NL	ZE	PL	PL
PM	PM	PM	PM	PL	PL
PL	PM	PM	PM	PL	PL

표 2. 마찰력 보상량 퍼지추론 규칙.

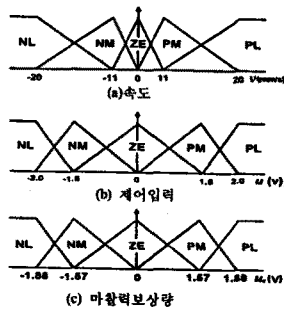


그림. 7 소속함수.

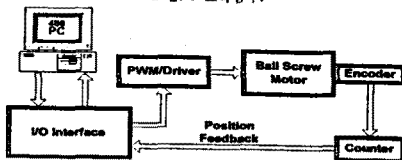


그림. 8 실험 시스템의 구성도.

## 6. 시뮬레이션 및 실험결과

Runge-Kutta 4차 방법을 사용하여 제어시스템에 대한 시뮬레이션을 하였다. 실험시스템의 구성은 그림 8과 같다. 직류모터는 외란에 강한 digital PWM 회로를 사용하여 구동한다. 위치측정을 위하여 엔코더의 신호를 4채배하여 카운터로 계수한다. 위치분해능은 2.5  $\mu\text{m}$ 이다. 극배치제어기와 퍼지 마찰력보상기의 제어법칙은 IBM PC486DX2/66으로 계산한다. PC와 주변회로의 인터페이스를 위해 PIO를 사용한다. 샘플링주기는 1 ms으로 설정하였다. 시뮬레이션과 실험은 마찰력 보상을 하지 않은 경우와 속도와 제어입력에 근거한 마찰력보상기를 사용한 경우 및 퍼지 논리 마찰력보상기를 사용한 경우에 대하여 목표위치 5.0  $\times 10^4 \mu\text{m}$ , 최대속도 2.0  $\times 10^5 \mu\text{m/s}$ , 최대가속도 2.0  $\times 10^6 \mu\text{m/s}^2$ 의 사다리꼴 속도지령을 주어 수행하고 세가지 경우를 비교하여 제안된 퍼지 논리 마찰력보상기의 성능을 확인한다.

### 6.1 마찰력 보상을 하지 않은 경우

그림 9는 마찰력 보상을 하지 않고 극배치제어기만 사용한 경우에 대한 시뮬레이션과 실험결과를 나타낸 것이다. 전체 추종 성능을 살펴보면 초기에 정지마찰력에 의한 응답지연이 20 ms정도 나타나고 등속구간에서도 위치오차가 계속 유지되며 정상상태에서도 위치오차가 남아있다. 그림 9 (b)는 그림 (a)의 직사각형 부근을 확대한 것이다. 정상상태 오차가 실험에서는 약 45  $\mu\text{m}$ 정도가 발생하고 시뮬레이션에서는 정상상태 오차가 약 36  $\mu\text{m}$ 정도이다. 정상상태에서 위치오차가 남아있는 이유는 제어입력이 마찰력을 극복할 만큼 크지 못하기 때문이다. 시뮬레이션과 실험의 응답차이가 나타나는 이유는 계산으로부터 얻은 선형위치결정기구의 매개변수가 실제값과 일치하지 않기 때문이다.

### 6.2 속도와 제어입력에 근거한 마찰력보상기를 사용한 경우

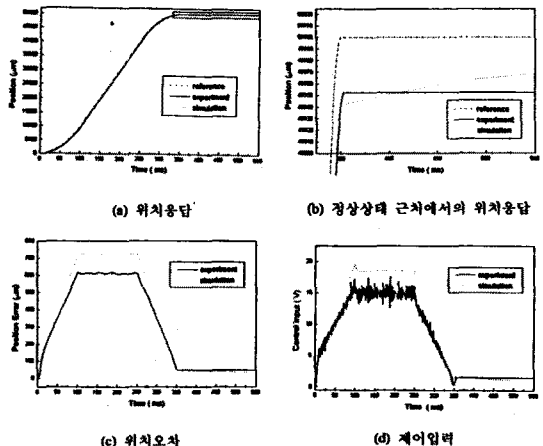


그림. 9 마찰력 보상을 하지 않은 경우의 실험과 모의실험.

그림 10은 속도와 제어입력에 근거한 비선형적인 마찰력 보상기를 사용한 경우에  $U_0^*$ ,  $U_1^*$ ,  $U_2^*$ ,  $U_3^*$ 의 양들은 각각 1.88 V, 1.88 V, 1.57 V, 1.57 V로 하였을 때 시뮬레이션과 실험결과를 나타낸 것이다. 시뮬레이션과 실험에서 모두 초기의 정지마찰력이 보상되므로 응답지연은 나타나지 않는다. 또한 동속구간에서도 위치오차가 20  $\mu\text{m}$  정도로 추종정능이 개선되지만 정상상태에서 진동이 심하게 발생함을 살펴볼 수 있다. 정상상태에서 응답은 목표위치에 거의 수렴하지만 제어입력이 계속 진동하면서 진동이 남아있게 된다. 정상상태에서 마찰력 보상값이 급격히 변동하여 제어입력이 크게 바뀌기 때문에 진동이 유발된다. 실험에서는 시뮬레이션에서보다 진폭이 큰데, 이것은 모델링되지 않은 시간 지연 등의 동특성 때문인 것으로 추측된다.

### 6.3 퍼지마찰력 보상기를 사용한 경우

그림 11은 퍼지논리를 이용한 마찰력보상기를 사용한 경우에 대한 시뮬레이션과 실험결과이다. 두 경우 모두 적절한 마찰력 보상으로 초기의 응답지연은 나타나지 않고 약간의 오버슈트가 발생하지만 정상상태에서 진동이 거의 나타나지 않고 정상상태에서도 위치오차가 약 5  $\mu\text{m}$  정도이다. 또한 시뮬레이션에서는 정상상태 오차도 거의 3  $\mu\text{m}$  안으로 수렴한다. 퍼지 마찰력보상기를 사용한 경우에는 전체적으로 정상상태 오차를 개선하는 것을 볼 수 있다. 마찰력 보상을 전혀 하지 않은 경우에 비해 정상상태가 향상됨을 확인할 수 있다. 또한 속도와 제어입력에 근거한 마찰력보상기를 사용한 경우에 비하여 제어입력의 진동이 거의 나타나지 않는다. 실험결과에서 위치오차가 5  $\mu\text{m}$ 인데 4채배한 엔코더의 분해능이 2.5  $\mu\text{m}$ 임을 감안하면 성능이 우수함을 알 수 있다.

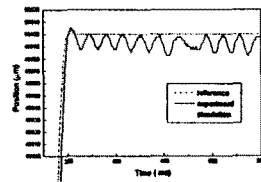
### 7. 결론

본 논문에서는 속도와 위치의 함수이며, 시변요소로 작용하는 마찰력에 의한 위치오차를 줄이고 빠른 시간내에 계산이 가능하고 파라미터 변화에 강인한 퍼지논리 마찰력보상기를 제안하였다. 시뮬레이션과 실험을 통하여 제안된 마찰력 보상기가 위치 오차를 감소시키 것을 확인하였다. 본 연구에서 사용한 PWM 모터구동회로의 분해능이 7bit인 관계로 미세한 보상은 불가능하다. 그러나 분해능을 개선하면 보다 나은 성능을 얻을 수 있을 것이다. 또한 보상량의 소속집합의 수를 늘이고 추론규칙을 개선하면 가감속구간의 진동현상을 감소시킬 수 있다고 생각된다.

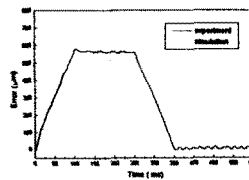
### 참고 문헌

[1] B. Armstrong, *Control of Machines with Friction*, Kluwer Academy Publishers, 1991, pp.7-42.

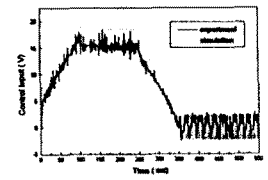
[2] B. Armstrong and P. Dupont, 1993, "Friction Modelling for Control," Proc. of the American Control Conference, pp. 1905-1909.  
 [3] C. Caundas, H. Olson, K. J. Åström, and P. Lischinsky, 1993, "Dynamic Friction Models and Control Design," Proc. of the American Control Conference, pp. 1920-1926.  
 [4] S. Jee, Y. Koren, 1994, "Friction Compensation in Feed Drive Systems Using An Adaptive Fuzzy Logic Control," ASME DSC. Vol. 55-2, pp. 885-893.  
 [5] S. Yang, 1992, "A Stable Friction Compensation Scheme for Motion Control Systems," KSME, Vol.6, pp. 95-100.P.  
 [6] E. Wellstead and M. B. Zarrop, *Self-Tuning Systems*, John Wiley & Sons, 1991, pp.253-256.  
 [7] LANDAU, *System identification and control design*, Prentice Hall, 1990, pp 69-95.



(a) 정상상태 근처에서의 위치응답

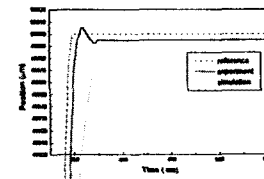


(b) 위치오차

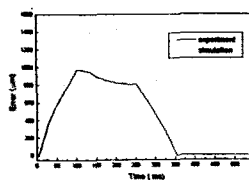


(c) 제어입력

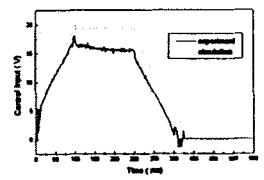
그림. 10 속도와 제어입력에 근거한 마찰력 보상기법을 사용한 경우의 실험과 모의실험.



(a) 정상상태 근처에서의 위치응답



(b) 위치오차



(c) 제어입력

그림. 11 퍼지마찰력보상기를 사용한 경우의 실험과 모의실험.