

이송기구의 정밀 위치제어

(Precision Position Control of Feed Drives)

송 우 근*(포항공과대학교), 최 우 천(고려대학교), 조 동 우(포항공과대학교), 이 응 석(산업과학기술연구소)
W. K. Song(POSTECH), W. C. Choi(Korea Univ.), D. W. Cho(POSTECH), E. S. LEE(RIST)

ABSTRACT

An essential ingredient in precision machining is a positioning system that responds quickly and precisely to very small input signal. In this paper, two different positioning systems were presented for the precision positioning control. The one is a friction drive system, the other is a ballscrew system. The friction drive system was composed of an air sliding guide and a friction drive. The ballscrew system was made of a ballscrew and a linear guide. Nonlinear behaviors of the given systems tend to make the system inaccurate. The paper looked at the phenomena that has caused the positioning error. These apparently nonlinear phenomena can be attributed mainly to the presence of the nonlinear friction and slip effect plus the dynamic change from the microdynamic to the macrodynamic and from the macrodynamic to the microdynamic. For the control of the positioning system, the control algorithm based on a neural network is suggested. The FEL(Feedback Error Learning) controller can learn the inverse dynamics of a nonlinear system by using the neural network controller, and stabilize the system by a linear controller. In the experiment, PTP control is implemented within the maximum error of $0.05 \mu\text{m} \sim 0.1 \mu\text{m}$ when $1 \mu\text{m}$ step reference input is applied and that of maximum $1 \mu\text{m}$ when $1000 \mu\text{m}$ step reference input is given. Sinusoidal inputs with the amplitude of $1 \mu\text{m}$ and $1000 \mu\text{m}$ are used for the tracking control of the positioning system. Experimental results of the proposed algorithm are shown to be superior to those of conventional PD controls.

Keywords : Friction Drive(마찰구동장치), Ballscrew(볼스크류), Microdynamic(미시적 동력학)
Macrodynamic(거시적 동력학), Slip(슬립), Friction(마찰), Feedback Error Learning(귀환오차 학습법)

1. 서론

기계 부품의 소형화와 정밀화는 최근 여러 분야에서 절실히 요구되는 성질이다. 이러한 욕구를 만족시키기 위해서는 정밀 가공이 이루어져야 한다. 정밀 가공에 기여하는 연구는 테이블이나 공구를 원하는 위치에 얼마나 정확히 이송시킬 수 있는가 하는 것이다.

최근 많이 사용되고 있는 정밀 이송 장치로는 볼스크류(ball screw)와 마찰구동장치(friction drive) 등을 들 수 있다. 볼스크류는 마찰 저항이 작고, 예압을 부여함으로써 배래식을 없앨 수 있으며, 규격화 되어 있어 원하는 용도의 제품을 구입하여 사용할 수 있다. 그리고 다른 이송기구 보다도 리드가 작아서 정밀 위치 이송에 유리하다. 마찰구동장치는 고속 운전시 소음이 거의 없으며, 구조상 배래식이 존재하지 않고, 구조가 단순하여 제작이 용이하다는 장점을 가지고 있다. 그러나, 부하용량이 크지 못하다는 것이 단점으로 지적되고 있다.

마찰구동장치에 대한 연구는 일본에서 활발히 진행되고 있다. Otsuka와 Takahashi(1990)(1992)^{[1][2]}는 트랙션 성질을 고찰하고 사다리꼴 속도 제어를 적용시켜서 고속 위치 결정에는 좋은 결과를 보였으나 위치 정밀도는 기존의 연구에 비하여 밟전된 경향을 보여주지 못했다. 볼스

크류는 마찰구동장치에 비하여 적용 분야가 폭넓고 다양한 연구가 활발히 진행되고 있다. Otsuka와 Fukada(1993)^[3]는 볼스크류 시스템에 'bit control'을 적용시켜서 정밀한 이송계를 구축하였다. 그러나 아직까지 이루어진 연구의 대부분이 PTP(point to point) 제어에만 집중되었고 추적제어에 관한 연구는 이루어지지 않았다.

본 연구에서는 볼스크류에 리니어 가이드(linear guide)를 부착시켜서 이송계를 구성하였다. 마찰구동장치는 단순한 구조를 갖도록 설계하고 제작하였다. 그리고 마찰구동장치에 공기 정압 안내면을 부착시켜서 볼스크류 시스템과 동일한 역할을 하는 이송계를 구성하였다. 위치센서로는 $0.01 \mu\text{m}$ 분해능의 레이저 거리측정기(laser interferometer)를 이용하였다.

본 연구에서는 마찰구동장치와 볼스크류 시스템을 이용하여 정밀 위치제어를 수행할 때 발생되는 이송계의 비선형성을 찾아내었다. 비선형성은 위치 정밀도를 저해하는 주요 원인이다. 따라서 이러한 비선형 시스템의 제어를 위해서 신경회로망 제어기(neural network controller)를 구성하였다. 그리고 이를 이용하여 두 가지 이송계에 대하여 PTP 제어와 추적제어를 수행하였다.

2. 이송계의 구성

2.1 마찰구동장치 시스템

마찰구동장치 안내면을 공기 정압 안내면으로 채택한 이유는 다른 안내면에 비해서 공기정압 안내면이 마찰이 작고 그로 인한 스틱슬립(stick-slip) 현상을 줄여주기 때문이다. 본 연구에 사용한 마찰구동장치 시스템은 그림 1과 같은데 두개의 톤러 사이에 슬라이더를 끼우고 예압을 가하였다. 슬라이더 끝에 테이블을 설치하였다. 공기는 테이블을 통하여 공급되며 이를 위하여 테이블 안쪽에 16 개의 공기 배어링이 설치되어 있다. 테이블의 위치 검출은 레이저 거리측정기를 사용하고 레이저 디스플레이어로 부터 GPIB 통신을 통하여 받은 데이터를 PC에 기록하였다. 최종적으로 PC로 제어입력을 계산하여 모터 드라이브에 가해줌으로써 전체 이송계를 구성하게 된다.

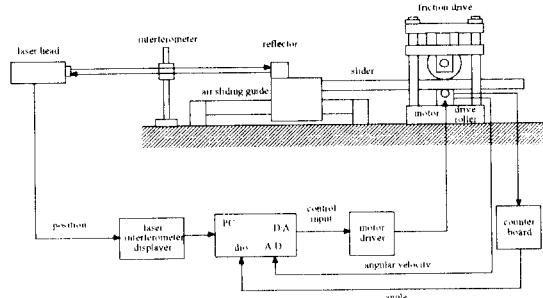


그림 1 마찰구동장치 시스템

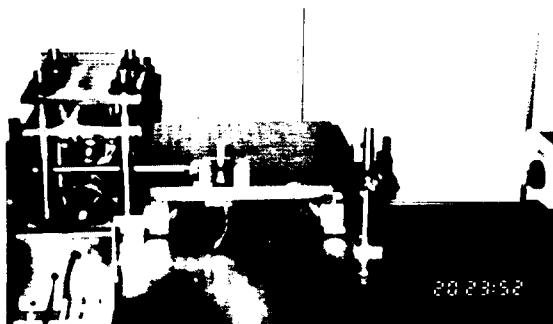


사진 1 마찰구동장치 시스템

그림 1은 시스템의 구성을 나타낸 것이고 사진 1은 실험에 사용한 마찰구동장치와 주변기기들을 나타내고 있다. 시스템에 사용한 모터와 마찰구동장치의 사양은 표 1과 같다.

구동롤러의 반경	9.1685mm
리드	57.6073mm
모터 로터의 관성	$8 \times 10^{-3} \text{Kgm}^2$
토크 정수	1.2 Nm/A

표 1 마찰구동장치 시스템의 사양

2.2 볼스크류 시스템

볼스크류를 이용한 이송계는 볼스크류로 구동력을 전

달하고 리니어 가이드를 안내면으로 사용하는 THK 사의 제품을 구입하여 구성하였다. 볼스크류 시스템의 사양은 표 2 와 같다.

스크류의 직경	16mm
리드	5mm
모터 로터의 관성	$8 \times 10^{-3} \text{Kgm}^2$
토크 정수	1.2 Nm/A

표 2 볼스크류 시스템의 사양

이송계의 개략도는 그림 2 와 같다. 마찰구동장치 시스템과의 차이는 이송장치와 안내면 뿐이고 나머지는 모두 동일하다.

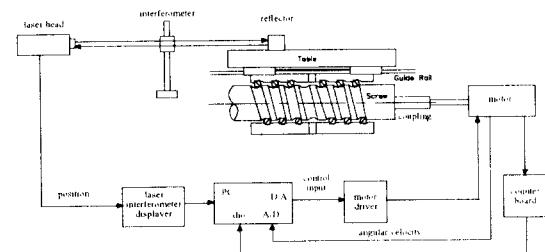


그림 2 볼스크류 시스템



사진 2 볼스크류 시스템

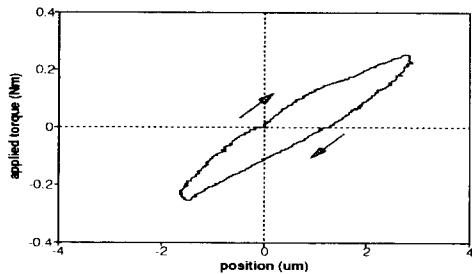
3. 이송계의 비선형 현상 고찰

3.1 미시적 거동과 거시적 거동

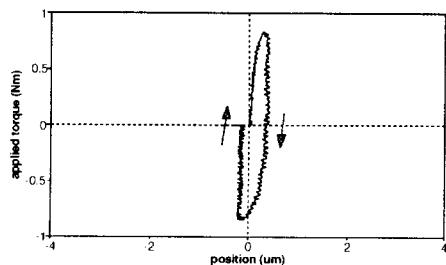
미시적 거동과 거시적 거동을 관찰하기 위해서 모터의 토크를 조금씩 증가시키면서 테이블의 이송거리를 레이저 거리 측정기로 관찰하였다. 마찰구동장치와 볼스크류 시스템에서 그림 3과 같이 테이블의 위치와 모터에 가해진 토크가 히스테리시스(hysteresis) 곡선을 그리는 영역이 존재하게 된다.

이러한 영역은 속도가 0인 지점이나 토크가 특정 크기 이하일 때 일어나게 된다. 이러한 미시적 거동이 일어나는 경우에 가해진 전압과 이송거리와의 관계는 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$u(t) = k(x)x \quad (1)$$



(a) 마찰구동장치



(b) 불스크류

그림 3. 변위와 토크의 관계 (미시적 거동)

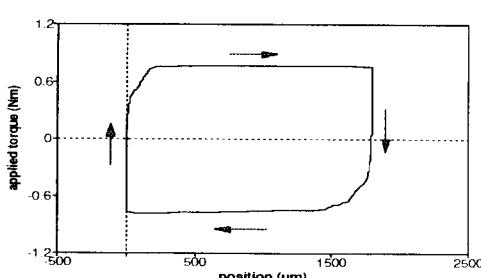
여기서 $u(t)$ 는 모터에 가해진 전압, $k(x)$ 는 곡선의 기울기, x 는 테이블의 이송거리이다. 불스크류 시스템은 리니어 가이드를 사용하기 때문에 $k(x)$ 값이 마찰구동장치에 비하여 크게 나타났다.

반면 그림 4 와 같이 토크를 계속 증가시키면 어느 순간 미시적 거동에서 벗어나 거시적 거동을하게 된다. 이 거동의 특징은 토크의 증가가 거의 없음에도 불구하고 이송된 거리는 상당히 크다는 것이다. 육안으로 식별이 가능한 거동이 이에 해당한다.

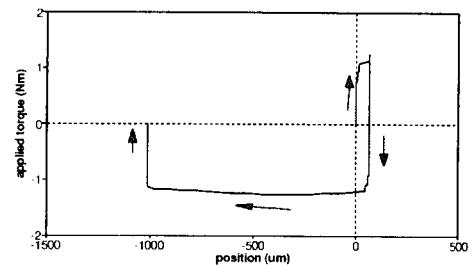
거시적 거동의 경우 운동 방정식은 식 (2)와 같이 표현된다.

$$J\ddot{v} = u(t) - (F_{fs} + F_{fc} + F_{fv}) \quad (2)$$

여기서, F_{fs} 는 정마찰력(static friction), F_{fc} 는 쿠仑마찰력



(a) 마찰구동장치 시스템



(b) 불스크류 시스템

그림 4. 테이블 변위와 토크의 관계 (거시적 거동)

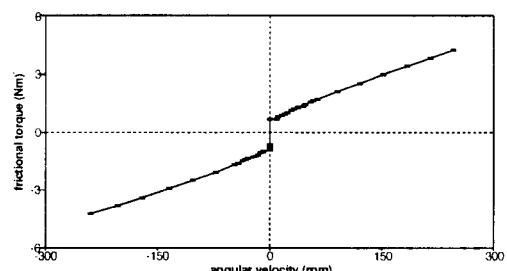
(coulomb friction). F_{fc} 는 점성마찰력(viscous friction)을 나타낸다. 그리고 J 는 이송계의 등가 관성이다.

마찰구동장치 시스템에 비하여 불스크류 시스템은 테이블의 이송방향에 따른 마찰력의 차이가 커서 원점에서 멀리 떨어져서 운동이 끝나는 것을 알 수 있었다.

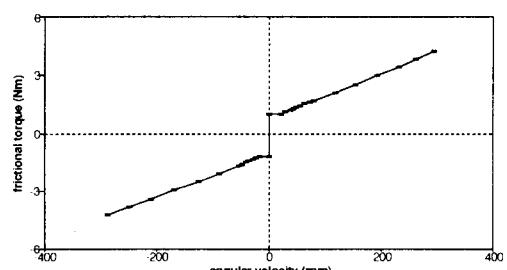
3.2 마찰

이송계에 작용하는 비선형성 중에서 위치 정밀도에 중요한 영향을 미치는 요인은 무엇보다도 마찰이다. 마찰은 모터 각속도의 방향에 따라서 그 크기와 부호가 변하게 된다^[5].

그림 5는 마찰력과 모터의 관계를 실험적으로 구한 결과를 보여주고 있다. 여기서 마찰구동장치의 예압은 예압기구 스프링의 스프링 힘을 의미한다.



(a) 마찰구동장치 시스템 (예압 400N)

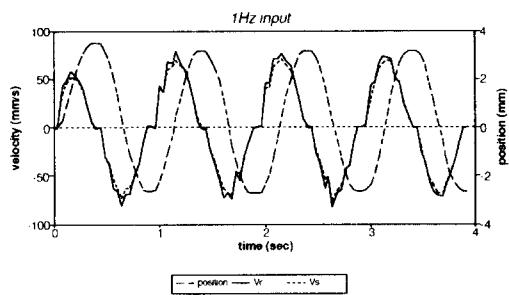


(b) 불스크류 시스템

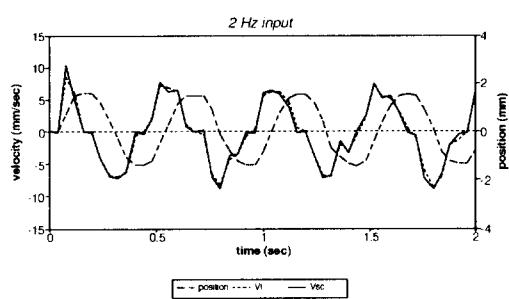
그림 5 불스크류 시스템의 마찰특성

3.3 슬립

슬립은 가속 구간과 감속 구간에서 테이블과 스크류 표면, 테이블과 구동롤러 표면 사이의 속도 차이에 의하여 생긴다. 본 연구에서는 슬립의 영향을 관찰하기 위하여 모터의 각속도에 리드를 곱한 값과 레이저 속도 측정기로 부터 얻은 값을 비교하였다. 그림 11은 마찰구 동장치와 볼스크류 시스템에서 두 신호의 차이를 보여준다. 그림에서 V_r 은 롤러 표면의 속도, V_s 는 슬라이더의 속도, V_t 는 테이블의 속도, V_{sc} 는 스크류 표면의 이송방향 속도를 말한다. 가속시에는 마찰구동장치의 구동롤러, 볼스크류의 스크류 표면의 이송방향 속도가 테이블의 속도보다 더 빨리 가속되고 감속시에는 더 빨리 감속되는 것을 알 수 있었다.



(a) 구동롤러 표면 속도와 테이블의 속도
(마찰구동장치)



(b) 스크류 표면의 이송방향 속도와 테이블 속도
(볼스크류 시스템)

그림 6 이송계에 존재하는 두 가지 속도 성분의 차이

4. 제어기의 설계

정밀 위치 이송을 하기 위해서는 제어기의 성능이 시스템의 비선형성에 관계없이 좋은 결과를 보여야만 한다. 그래서 본 연구에서는 Kawato 가 제안한 귀환오차학습 제어기(Feedback Error Learning controller - FEL 제어기)^[4]을 이용하여 PTP 제어와 추적제어를 실시하였다. 그리고, PD 제어기와 그 성능을 비교하여 제어기의 우수성을 입증하였다.

귀환오차학습법을 바탕으로 하는 제어기는 그림 7과 같이 귀환제어기의 출력을 오차로 이용하여 학습하는

피드포워드 제어기(feedforward controller)의 구조를 갖는다. 이 구조의 장점은 실시간 제어시 귀환제어기를 이용하여 초기의 안정성을 확보하고, 시간이 흐름에 따라서 신경회로망이 제어를 전담하는 구조라는 사실이다. 그리고 신경회로망의 장점인 시스템의 정확한 모델링이 필요하지 않다는 것과 계수의 동정이 필요하지 않다는 점이다.

신경회로망의 구조는 입력층, 중간층, 출력층으로 구성된다. 중간층을 사용하면 시스템의 비선형성을 잘 동정하므로 비선형 시스템의 제어에 여러가지 장점을 가지지만 중간층의 수가 늘어나면 실시간제어에 어려움이 따르게 된다. 반면 입력층과 출력층으로만 구성된 구조는 구조가 단순하고, 실시간 제어에 적용이 용이한 장점을 가지고 있으나, 시스템의 특성을 잘 파악하고, 출력이 외에 되도록 많은 상태변수들을 측정해야 한다는 것이 단점으로 지적된다.

본 연구에서 사용한 신경회로망 구조는 그림 7과 동일한 것으로 단층구조로 이루어져 있으며, 실시간 제어에 사용하였다. 그리고, 신경회로망의 입력신호는 기준위치신호, 기준속도신호, 모터의 각속도신호, 테이블의 위치신호를 사용하였다. 모터에 가해지는 전압신호는 PD 제어기의 출력 V_r 과 신경회로망 제어기의 출력 V_n 의 합이며, 매 샘플링 시간마다 시냅틱 가중치를 학습시켰다. V_n 은 각 시냅틱 가중치(synaptic weight)에 상태변수를 곱하고, 그 합으로 부터 다음 식(7)과 같이 얻을 수 있다.

$$A_r X_r + A_v \dot{X}_r + A_y X + A_w \omega = V_n \quad (3)$$

여기서 A_r 은 기준 위치의 시냅틱 가중치, A_v 는 기준 속도의 시냅틱 가중치, A_y 는 레이저 거리측정기로 부터 읽어들인 거리신호 시냅틱 가중치, A_w 는 모터의 각속도 시냅틱 가중치이다. 그리고, X_r 은 기준 위치, \dot{X}_r 은 기준 속도, X 는 테이블의 이송거리, ω 는 모터의 각속도 신호이다.

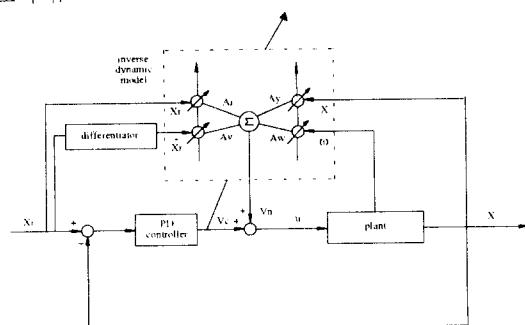


그림 7. 귀환오차학습법의 개략도

$$\begin{aligned} \frac{dA_r}{dt} &= \alpha Y_r V_c(t) \\ \frac{dA_v}{dt} &= \alpha \dot{X}_r V_c(t) \\ \frac{dA_y}{dt} &= \alpha X V_c(t) \\ \frac{dA_w}{dt} &= \alpha \omega V_c(t) \end{aligned} \quad (4)$$

시냅틱 가중치의 학습법칙은 식 (4)와 같이 가중치의 시간에 따른 변화율을 PD 제어기의 출력에 상태변수와 학습률을 곱한 값으로 설정하였다.

5. 실험

5.1 마찰구동장치 시스템

5.1.1 PTP 제어

먼저 선형제어기인 PD 제어기와 신경회로망 제어기인 FEL 제어기를 이용하여 거시적 영역에서 PTP 제어를 한 경우에 대한 실험결과를 비교하면 그림 8과 같다.

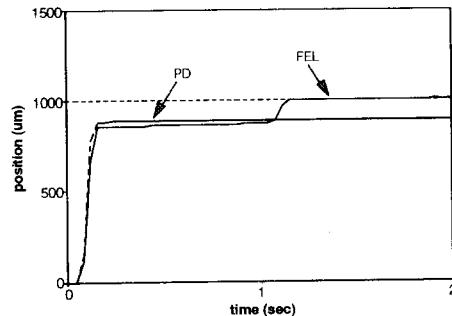


그림 8. PD 거시적 영역에서 PD 와 FEL 제어기의 비교
($1000 \mu\text{m}$)

PD 제어기를 사용하는 경우는 테이블의 위치신호가 진동없이 안정하였지만 정상상태의 오차가 크게 발생하고, 그 오차를 극복하지 못함을 알 수 있다. 반면 FEL 제어기를 사용하는 경우는 초기에 PD 제어기와 마찬가지로 오차가 발생하지만 학습이 진행됨에 따라서 그 오차를 극복하여 $1000 \mu\text{m}$ 기준입력시 정상상태 오차가 $1 \mu\text{m}$ 이내에 들어가는 것을 알 수 있었다.

기준입력이 미시적 영역으로 바뀌었을 때 제어기의 성능을 보기 위하여 기준입력을 $1 \mu\text{m}$ 로 바꾸고, 이득조정을 하지 않은 상태에서 두 가지 제어기를 비교하였다. 그림 9는 거리출력을 이용한 성능 비교로서 FEL은 과도상태의 성능도 우수하고 정상상태에서 $0.05 \mu\text{m}$ 의 위치오차를 보였으나, PD 제어기는 거의 움직임이 없고, 위치0에서 진동하는 특성을 나타내었다. 이상의 논의를 종합하면 FEL 제어기의 사용이 거시적 영역과 미시적 영역에서 선형제어기에 비하여 상당히 좋은 성능을 가지고 있음을 알 수 있다.

5.1.2 주적제어

FEL 제어기를 사용하는 목적이 두 가지 동역학 영역에서 모두 제어성이 우수한 제어기를 설계하기 위해서 이므로, 본 절에서는 삼각함수 입력을 기준입력으로 하여 두 제어기의 성능을 평가하도록 한다.

그림 10은 거시적 영역인 $1000 \mu\text{m}$ 크기와 주파수 0.1Hz 의 기준입력을 가한 경우 시스템의 출력을 나타낸다. FEL 제어기는 기준입력을 잘 추종함을 알 수 있다. 이송중에 생기는 리플은 여러 가지 원인이 있겠지만 샘플링 시간이 느려서 제어입력이 연속적으로 가해지지

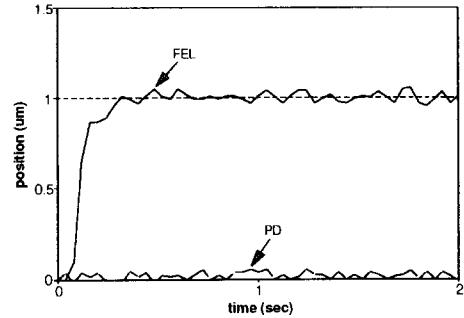


그림 9 미시적 영역에서 FEL 제어기와
PD 제어기의 비교 ($1 \mu\text{m}$)

않기 때문으로 생각된다. 그러나, PD 제어기는 약간의 오차를 계속가지고 추종하고, 상 지연(phase delay)도 또한 동반되었다.

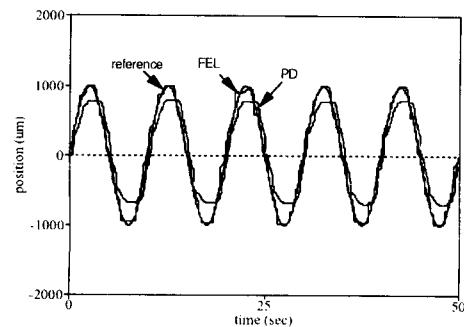


그림 10. 거시적 영역에서 PD 와 FEL 의 비교

거시적 영역에서 이득조절을 한 다음 미시적 영역에서 추적제어를 한 경우 어떤 성능을 보이는가를 보기 위하여 그림 10의 실험에서 조절한 이득을 그대로 미시적 영역에 적용해 보았다. 이 경우 그림 11에서처럼 FEL 제어기는 거의 변함없이 잘 추종하지만 PD 제어기는 전혀 추종하지 못함을 알 수 있다.

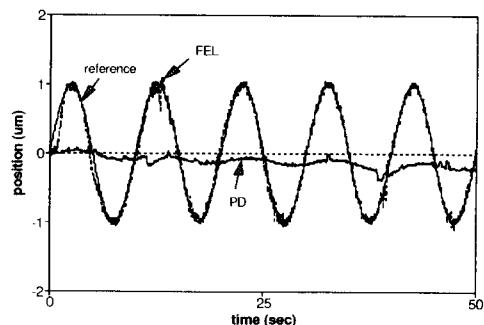


그림 11. 미시적 영역에서 PD 와 FEL 의 비교

이상으로 선형제어기에 비해서 FEL 제어기는 미시적 영역에서도 잘 추종함을 알 수 있다. 그리고 단층구조의 신경회로망제어기를 이용하여 실시간으로 제어 가능하였고, PD 제어기 보다도 두 가지 동력학 영역 모두에서 효율적으로 추적제어 되었다.

5.2 볼스크류 시스템

5.2.1 PTP 제어

본 장에서는 볼스크류와 선형 안내면을 이용하여 구성한 이송계를 대상으로 PD 제어기와 FEL 제어기의 성능을 비교하였다.

그림 12는 이송계에 $1000\mu m$ 스텝을 기준 입력으로 가했을 때 두 제어기의 성능을 비교한 것이다. PD 제어기는 정상상태 오차가 $100\mu m$ 정도 남아있는 것을 볼 수 있다. 반면 FEL 제어기는 약 1초가 될 때까지 계속 학습이 이루어져서 $1\mu m$ 이하의 정상상태 오차가 남았다.

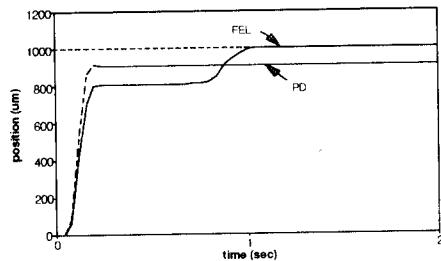


그림 12 $1000\mu m$ 스텝 기준 입력 시 PD 와 FEL 제어기의 비교

기준 입력이 미시적 영역 내의 값으로 주어졌을 때 제어기의 성능을 비교하기 위하여 이송계에 $1\mu m$ 스텝 입력을 가하였다. 이득을 조정하지 않은 상태에서 두 제어기의 성능을 비교하였다.

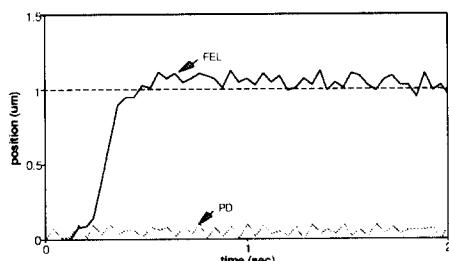


그림 13 $1\mu m$ 스텝 입력 시 PD 제어기와 FEL 제어기의 성능 비교

PD 제어기를 사용한 경우는 $1\mu m$ 스텝 입력을 기준입력으로 가한 경우 그림 12와 같이 0 근처에서 벗어나지 못하였다. 그러나, FEL 제어기를 사용한 경우는 1초 이후에 $0.1\mu m$ 이하의 오차를 보였다. 이와 같이 FEL 제어

기는 두 동역학 영역 모두에서 우수한 제어성을 보여 준다.

5.2.2 추적제어

본 장에서는 PD 제어기와 FEL 제어기를 추적제어의 측면에서 비교하기 위하여 볼스크류 시스템에 두 가지 제어기 각각을 설치하였다. 삼각함수 기준입력을 따르도록 추적제어를 수행하였다. 본 실험에서는 레이저 거리 측정기의 샘플링 시간을 고려하여 기준입력의 주파수를 $0.1Hz$ 로 선택하였다.

그림 14는 이송계에 $1000\mu m$ 크기의 입력을 가한 경우에 대한 결과이다. 입력의 크기가 $1000\mu m$ 인 경우는 전 장에서 기술하였듯이 거시적 영역과 미시적 영역을 모두 포함한 운동이 일어나게 된다.

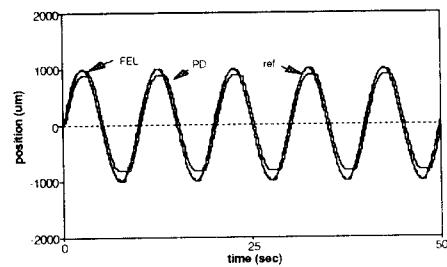


그림 14 $1000\mu m$ 크기의 삼각함수 입력을 가했을 때 PD 와 FEL 제어기의 비교

FEL 제어기는 약간의 리플은 있지만 기준입력을 잘 추종하는 것을 볼 수 있다. 반면 PD 제어기는 크기와 위상에서 모두 차이가 크게 나타났다.

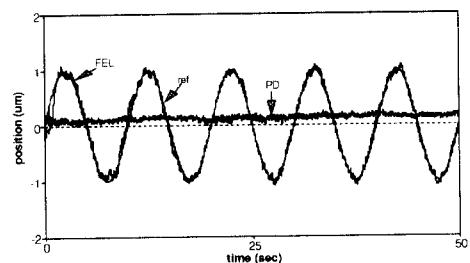


그림 15 $1\mu m$ 크기의 삼각함수를 기준입력으로 사용했을 때 PD 와 FEL 제어기의 성능 비교

운동이 미시적 영역에서만 일어나도록 하기 위해서 시스템에 $1\mu m$ 크기의 삼각함수 기준입력을 적용하였다. 이때 이득 조정을 다시하지 않고 두 가지 제어기를 사용한 결과를 비교하였다.

PD 제어기를 사용한 경우는 기준입력을 전혀 추적하지 못하였다. 반면 FEL 제어기를 사용했을 때는 그림 15와 같이 기준입력을 잘 추종하였다.

6. 결론

본 연구에서는 정밀 위치 제어에 사용되는 대표적인 이송장치 시스템 두 가지를 구성하였다. 첫째는 마찰구동 장치에 공기정압안내면을 부착시킨 이송계를 구성하였고 둘째는 볼스크류에 리니어 가이드를 부착시킨 시스템을 구성하였다.

정밀 위치 제어에서 고려해야 할 이송계의 비선형성으로 미시적, 거시적 거동, 마찰, 슬립등을 제시하였으며, 각각의 현상을 실험을 통하여 관찰하고 각각의 특성을 파악하였다.

신경회로망을 이용하여 비선형 동력학이 존재하는 이송계의 위치 제어를 성공적으로 수행하였다. 제어 결과 PTP 제어에서는 $1\text{ }\mu\text{m}$ 스텝입력시 마찰구동 장치는 $\pm 50\text{nm}$ 이하의 오차를 보였으며, 볼스크류 시스템은 $\pm 100\text{nm}$ 이하의 오차를 보였다. 이러한 정밀도는 레이저 거리측정기에서 테이블의 움직임이 전혀 없을 때에 흔들리는 정도이다. 그리고, $1000\text{ }\mu\text{m}$ 스텝입력은 2 초 이내에 $1\text{ }\mu\text{m}$ 이내의 위치 제어를 수행할 수 있었다. 두 가지 거동 모두에 대하여 선형제어기 보다 신경회로망 제어기가 우수함을 입증하였다.

참고문헌

- [1] M. Takahashi and J. Otsuka, "Study of Precision Positioning using a Friction Drive (I)," *Bull. Japan Soc. of Prec. Engg.*, Vol.24, pp. 21-26, 1990.
- [2] J. Otsuka and M. Takahashi, "Study of Precision Positioning using a Friction Drive (II)," *Bull. Japan Soc. of Prec. Engg.*, Vol.26, pp. 315-320, 1992.
- [3] J. Otsuka and S. Fukada, "Ultraprecision Positioning Using Lead Screw Drive (2nd Report)," *Int. J. Japan Soc. Prec. Engg.*, Vol.27, pp.142-147, 1993.
- [4] H. Miyamoto, M. Kawato, T. Setoyama, and R. Suzuki, "Feedback-Error-Learning Neural Network for Trajectory Control of a Robotic Manipulator," *Neural Networks*, Vol. 1, pp. 251-265, 1988.
- [5] B. Armstrong-Helouvry, *Control of Machines with Friction*, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1991.