

역 히스테리시스 모델링과 오차학습을 이용한 압전구동기의 초정밀 위치제어

김형석*(울산대 대학원 기계자동차공학과), 이수희(울산대 대학원 기계자동차공학과),
정해철(울산대 대학원 기계자동차공학과), 이병룡(울산대 기계자동차공학부),
안경관(울산대 기계자동차공학부)

Precision Position Control System of Piezoelectric Actuator
Using Inverse Hysteresis Modeling and Error Learning Method

Hyung Seok Kim (School of Mechanical and Automotive Engineering),
Soo Hee Lee (School of Mechanical and Automotive Engineering),
Hae Chul Jung (School of Mechanical and Automotive Engineering),
Byung Ryong Lee (School of Mechanical and Automotive Engineering),
Kyung Kwan Ahn (School of Mechanical and Automotive Engineering),

ABSTRACT

A piezoelectric actuator yields hysteresis effect due to its composed ferroelectric. Hysteresis nonlinearity is neglected when a piezoelectric actuator moves with short stroke. However when it moves with long stroke and high frequency, the hysteresis nonlinearity can not be neglected. The hysteresis nonlinearity of piezoelectric actuator degrades the control performance in precision position control. In this paper, in order to improve the control performance of piezoelectric actuator, an inverse modeling scheme is proposed to compensate the hysteresis nonlinearity problem. And feedforward - feedback controller is proposed to give a good tracking performance. The Feedforward controller is inverse hysteresis model, Neural network and PID control is used as a feedback controller. To show the feasibility of the proposed controller and hysteresis modeling, some experiments have been carried out. It is concluded that the proposed control scheme gives good tracking performance

Key Words : Piezoelectric(압전구동기), Ferroelectric(강유전체), Hyseresis(히스테리시스), Nonlinearity(비선형성),
Feedforward(앞먹임제어), Inverse modeling(역히스테리시스 모델링)

1. 서론

최근 형상기억합금, 정전 액츄에이터, 보이스 코일 모터, 압전소자 등의 연구가 활발하게 진행되고 있다. 압전소자는 기계적 에너지와 전기적 에너지 사이에서 양방향으로 변환을 일으킬 수 있으며 이러한 성질을 이용하면 센서와 구동기 모두로 사용될 수 있다[1]. 압전구동기는 고응답성, 고강성, 고분해능 그리고 양호한 주파수 응답특성을 가지고 있다. 반면에, 압전구동기는 강유전체이므로 가해진 전압에 대한 변위 응답이 히스테리시스 성질을 가지며 이러한 성질로 인해 추종제어에서의 정밀도에 한계가 있다.

히스테리시스 현상은 매우 복잡한 과정을 통하여 일어나기 때문에 미시적인 설명이 어렵다[2]. 압전구동기의 이러한 비선형성을 보정하기 위한

연구가 지금까지 꾸준히 진행되고 왔다. S. Jung 과 S. Kim[2][3]은 압전구동기의 비선형특성이 크게 전기적 비선형 특성과 이력현상에 의해 좌우되는 것으로 보고 먼저 하드웨어로 압전구동기의 전기적 비선형 특성을 억제하여 입력조건에 따라 비선형 특성이 변하는 것을 억제한 후 이력현상의 모형기법을 시도하였다. Newcomb 과 Flinn[4]은 변위를 일으키는 제어입력으로 전압대신에 전하(charge)를 이용한다면 압전구동기의 비선형 특성을 없애고 선형적으로 제어할 수 있다고 제안하였다. 하지만, 이 방법은 전압대신 전하를 제어입력으로 사용하기 위해서는 특별히 고안된 전하구동증폭기(charge drive amplifier)와 같이 하드웨어적인 요구사항이 많아지게 되고 변위의 감도가 떨어지게 되는 단점이 있다. 압전구동기의 히스테리시스

현상을 줄이는 간단한 방법을 Kaizuka 와 Sui 도 제안하였다[5]. 이 방법은 구동기와 직렬로 캐패시터(capacitor)를 연결함으로써 전압을 이용하여 선형적으로 구동기를 제어할 수 있다는 것이다. 그렇지만, 이 방법을 이용할 경우에는 같은 변위 출력을 위해 상대적으로 매우 높은 전압을 가해야 한다는 단점이 있다.

본 논문에서는 압전구동기의 추종 성능 향상을 위해 비선형 히스테리시스 특성, 즉 전압과 변위 사이의 기하학적인 관계를 근사적으로 표현할 수 있는 수학적 모델링 방법을 제안하였다. 그리고 제안된 히스테리시스의 모델을 역으로 계산하여 원하는 변위에 대한 입력전압을 계산할 수 있는 역히스테리시스(inverse hysteresis) 모델을 제시하였다. 제안된 역히스테리시스 모델은 비교적 복잡한 패턴의 구동에서도 만족할 만한 추종성능을 주었으나, 압전구동기의 반전점(turning point), 즉, 전압이 상승하다가 하강 한다든지 전압이 하강하다가 상승하는 영역에서는 추종성능이 다시 떨어지는 것을 확인하였다. 본 논문에서는 이러한 반전점에서의 추종성능을 개선하기 위하여 히스테리시스 주 루프(major loop)와 소 루프(minor loop)간의 상대변위에 대한 전압편차 ΔV 을 보정하기 위하여 다층 신경회로망 보상기를 사용하였고 시스템이 가지고 있는 마찰이나 미지의 비선형 요소에 대한 피드백 오차를 보정하기 위하여 PID 제어를 추가하였다. 결과적으로, 제안된 제어기는 일반적인 PID 제어를 이용한 경우보다 추종성능이 많이 향상될 수 있다는 것을 보였다.

2. 역 히스테리시스 모델링

2.1 압전구동기의 역 히스테리시스 모델링

실제 시스템을 제어하기 위한 제어의 관점에서 보면 압전구동기가 원하는 목표변위로 동작하려면 어느 정도의 전압을 인가해야 하는 것, 즉 압전구동기의 역 히스테리시스(inverse hysteresis) 모델링이 필요하다. 따라서, 압전구동기의 제어를 위해서는 Fig.1 과 같이 주어진 변위에 대한 제어전압의 형태로 그래프로 변환하는 소위 역 히스테리시스 변환(inverse hysteresis mapping)이 필요하다. Fig.1 에서 곡선 1 은 주 루프에서 전압이 감소하는 구간에서의 곡선을 나타내며, 곡선 2,3 그리고 4 는 소 루프들의 전압감소 구간에서의 곡선을 나타내고 있다.

Fig.1 의 역 히스테리시스 루프 곡선들의 특징을 이용하여 압전구동기의 히스테리시스 특성을 나타내는 근사적인 수치모델을 구할 수 있다. Fig.2 에서 역 히스테리시스 곡선 1 과 곡선 2 가 각 곡선의 반전점을 기준으로 하여 단위 변위당 전압강하율이 근사적으로 같다고 한다면 변위량 Δe 와 전압강

하는 다음과 같은 관계가 성립된다.

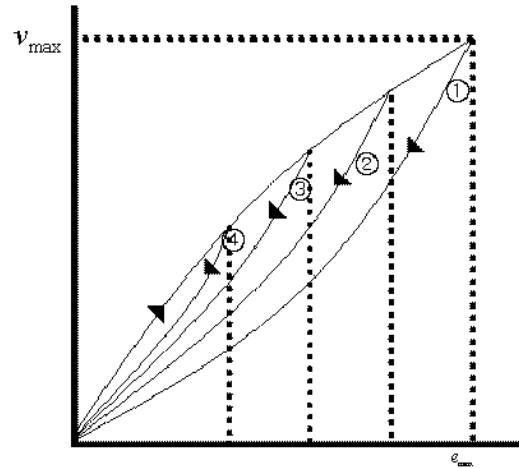


Fig.1 Inverse hysteresis mapping of hysteresis loops

$$\Delta e = e_b - e \quad (1)$$

$$(V_b - V_{down}) / \Delta e = \{V_{max} - H_{down}(e_{max} - \Delta e)\} / \Delta e \quad (2)$$

위 식들을 정리하면 압전구동기의 역 히스테리시스 수치모델은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$V_{down} = V_b - V_{max} + H_{down}(e_{max} - e_b + e) \quad (3)$$

위 식에서 사용된 변수는 다음과 같다. V_{down} : 제어 전압의 근사치, e : 현재의 변위, V_b : 하강 반전점에서의 전압, e_{max} : 주 루프의 최대 변위, V_{max} : 주 루프의 최대 전압, e_b : 하강 반전점에서의 변위, H_{down} : 주 루프의 전압하강 구간 보간식

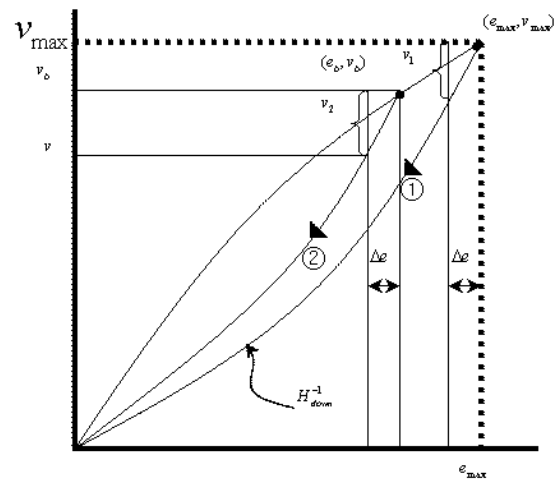


Fig.2 Parameters description for discrepancy compensation

식(3)은 Fig.2 에서 보는 바와 같이 곡선 1 과 곡선

2가 반전점을 기준으로 같은 변위-전압 기울기를 가지는 경우 즉, $V_1 = V_2$ 가 성립하는 경우에 정확한 제어전압을 구할 수 있다. 그러나, 일반적으로 압전구동기의 히스테리시스 곡선들은 Fig.3에서 보는 바와 같이 곡선 1과 곡선 2는 같은 기울기를 가지지 않는다. 반전점을 기점으로 변위를 Δe 만큼 감소시키면 ΔV 만큼의 전압편차를 가지게 된다. 따라서, 곡선 2의 임의의 위치에 필요한 전압은 곡선 1의 대응되는 위치의 전압에서 ΔV 만큼의 전압을 보상하여야 한다. 이와 같은 방법을 이용하면 곡선 2, 3 그리고 곡선 4의 경우도 임의의 변위에 대한 제어전압을 정확하게 구할 수 있다. 전압편차는 다음과 같이 정의된다.

$$\Delta V = V_2 - V_1 \quad (4)$$

따라서, 정확한 제어전압은 다음의 식으로 표현된다.

$$V = V_{down} - \Delta V \quad (5)$$

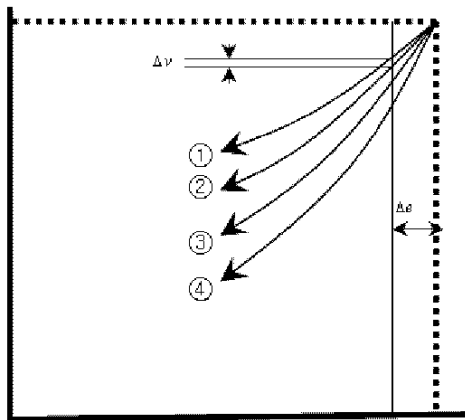


Fig.3 Voltage discrepancy between curves

마찬가지로 주 루프(major loop)의 하강 곡선상의 임의의 전압을 상승 반전점으로 하여 여러 개의 다중 히스테리시스 루프를 생성하여 Fig.1에서 Fig.4까지의 과정을 적용하면 다음과 같은 히스테리시스 수치 모델식을 구할 수 있다.

$$V_{up} = V_a + H_{up}(e - e_a) \quad (6)$$

$$V = V_{up} + \Delta V \quad (7)$$

위 식에서, e : 현재의 변위, V : 제어전압, V_a : 상승 반전점에서의 전압, e_a : 상승반전점에서의 변위, H_{up} : 주 루프의 전압 상승구간 보간식을 나타낸다.

3. 압전구동기의 제어시스템

본 연구에서는 히스테리시스 주 루프(major loop)와 소 루프(minor loop)간의 상대변위에 대한 전압편차 ΔV 을 보정하기 위하여 다중 신경회로망 보상기

를 사용하였다. 다중 신경회로망의 입력은 반전점에서의 변위값, 반점점과 제어위치간의 상대변위값이며, 신경망회로의 출력은 전압편차 ΔV 이다. 이를 위하여 신경회로망의 입력과 출력에 대한 학습데이터를 실험적으로 구하였다.

본 연구에서 제안된 압전구동기의 전체 제어기는 Fig.4와 같다. 그림에서 역 히스테리시스 모델은 주어진 변위에 대한 근사전압을 계산해 준다. 히스테리시스 주 루프(major loop)와 소 루프(minor loop)간의 상대변위에 대한 전압편차 ΔV 을 보정하기 위하여 다중 신경회로망 보상기를 사용하였다 그리고, 시스템이 가지고 있는 마찰이나 미지의 비선형 요소에 의한 피드백 오차를 보정하기 PID 제어기를 추가하였다.

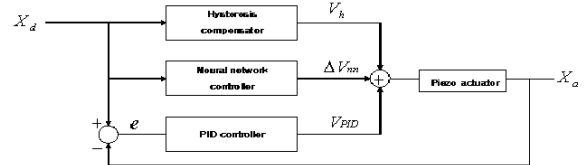


Fig. 4 Proposed Control system structure

4. 실험

4.1 실험데이터를 이용한 히스테리시스 모델링

본 연구에 사용된 압전구동기의 히스테리시스의 특성을 파악하기 위하여 주기가 1sec 이고 진폭이 다른 삼각파를 압전구동기의 고전압 증폭기에 인가하였다. 그 결과 Fig.5와 같이 주 루프와 각각 다른 하강 반전점을 갖는 소 루프들로 구성된 히스테리시스 루프를 얻을 수 있었다. Fig.5의 전압과 변위 데이터를 이용하여 얻은 주 루프의 상승곡선과 하강곡선에 대한 근사식은 다음과 같다.

$$H_{up} = -0.4995x^2 + 52.94x + 13.692 \quad (8)$$

$$H_{down} = 0.8524x^3 - 14.301x^2 + 123.58x - 183.05 \quad (9)$$

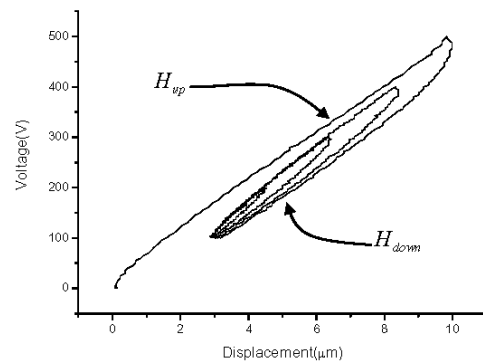


Fig. 5 Hysteresis Characteristics from experiments

4.2 신경회로망을 이용한 전압편차의 학습

앞에서 정의한 히스테리시스 주 루프(major loop)와 소 루프(minor loop)간의 상대변위에 대한 전압편차 ΔV 을 보정하기 위하여 다층 신경회로망을 이용하여 학습을 수행하였다. 학습을 위한 입력 데이터는 반전점의 위치, 반전점과 현재위치 간의 이격거리이다. 출력 데이터는 입력데이터에 대응하는 전압편차 ΔV 이다. 학습시간과 실제 적용시의 계산시간을 줄이기 위하여 신경회로망은 하강 반전점을 갖는 루프와 상승반전점을 갖는 2개의 신경회로망으로 분리되어 학습이 이루어졌다. Table 1과 Table 2은 각각의 경우에 대한 입력 및 출력데이터의 일부분을 보여주고 있다.

Table 1 하강반전점

반전점	Δe	ΔV
0.8	0.133	0.01
0.8	0.14	0.02
0.6	0.126	0.36
0.6	0.14	0.4
0.4	0.294	0.26
0.4	0.301	0.27
0.2	0.126	0.16
0.2	0.133	0.18

Table 2 상승반전점

반전점	Δe	ΔV
0.3	0.008	0.09
0.3	0.016	0.08
0.5	0.224	0.04
0.5	0.232	0.05
0.7	0.248	0.07
0.7	0.256	0.085
0.9	0.088	0.1
0.9	0.096	0.09

4.3 역 히스테리시스모델과 PID 및 신경회로망 제어기를 이용한 삼각파 추종 실험

주기가 1sec 이고 2~10 μm 사이를 진동하는 삼각파의 추종성능을 알아보기 위해 네 가지의 제어 입력으로 각각을 비교하였다. Fig.6 과 Fig.7은 역 히스테리시스 모델을 이용한 구동 실험으로써 대략 $\pm 0.5\mu m$ 정도의 오차를 가지고 구동하였다.

Fig. 8와 Fig. 9는 단순한 PID 제어기만을 이용한 실험으로 평균적으로 $\pm 100nm$ 정도의 오차를 가지고 제적을 추종하는 것을 알 수 있다. Fig.10과 Fig.11에서 역 히스테리시스 모델과 PID 제어기를

병렬로 결합시킨 제어기를 이용한 실험 결과를 보여준다. 오차 변화의 폭이 단순한 PID 제어기를 사용한 경우보다 줄었으며 대략 $\pm 80nm$ 정도의 오차로 구동하였다. Fig.12와 Fig.13은 역 히스테리시스 모델과 PID 제어기 및 신경회로망을 이용한 실험 결과이며 $\pm 60nm$ 정도의 오차로 구동하였다.

단순한 PID 제어기만을 이용한 구동 실험에서는 제적이 상승할 때와 하강할 때의 오차의 폭이 변화였지만 역 히스테리시스 모델과 PID 제어기를 병렬로 이용한 제어기에서는 오차의 변화폭이 없어지면서 단순한 PID 제어기만을 이용한 구동 초기에 나타났던 히스테리시스 특성으로 인한 Over shoot 현상 또한 없어짐을 발견 할 수 있었다. 또한, 역 히스테리시스 모델과 PID 제어기 및 신경회로망을 사용한 경우 전체적인 오차의 폭이 줄어든 것을 알 수 있었다.

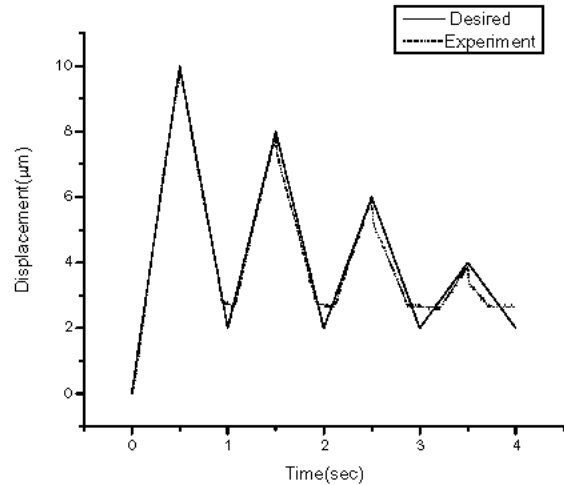


Fig.6 Tracking result of the piezoelectric actuator with inverse hysteresis model

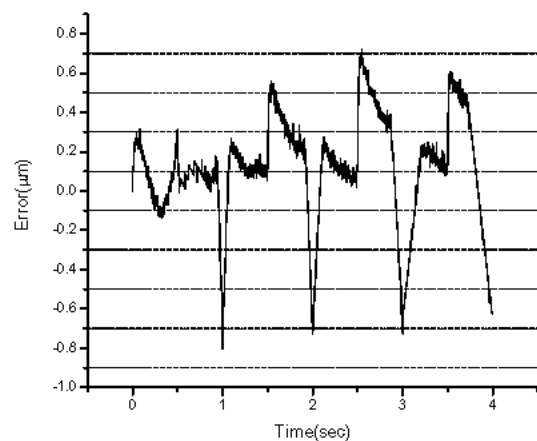


Fig.7 Tracking error of the piezoelectric actuator with inverse hysteresis model

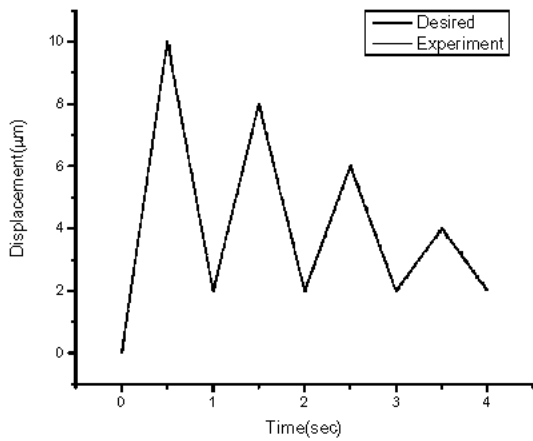


Fig.8 Tracking result of the piezoelectric actuator with PID control

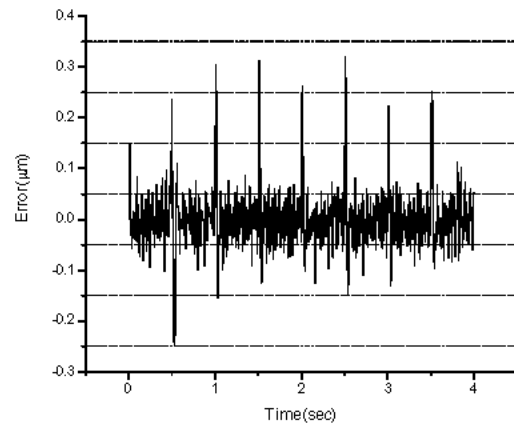


Fig.11 Tracking error of the piezoelectric actuator with inverse hysteresis model and PID

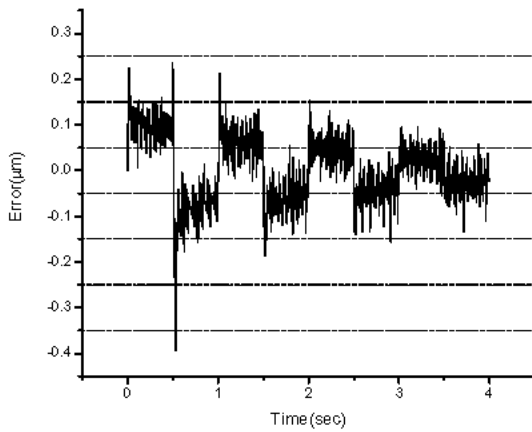


Fig.9 Tracking error of the piezoelectric actuator with PID control

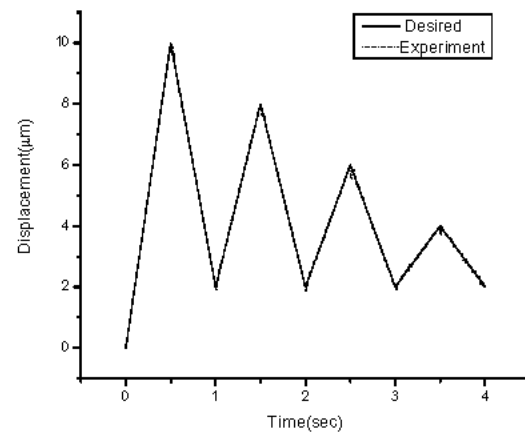


Fig.12 Tracking result of the piezoelectric actuator with nn_PID and inverse hysteresis model

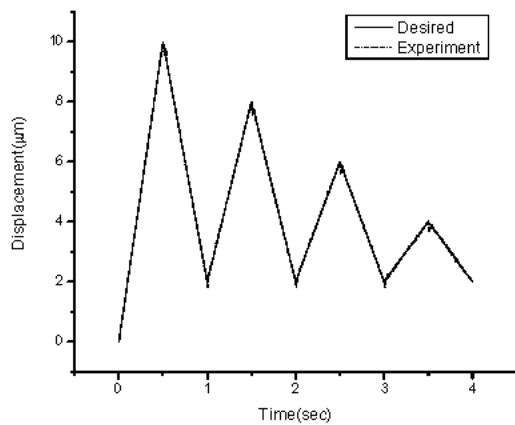


Fig.10 Tracking result of the piezoelectric actuator with inverse hysteresis model and PID

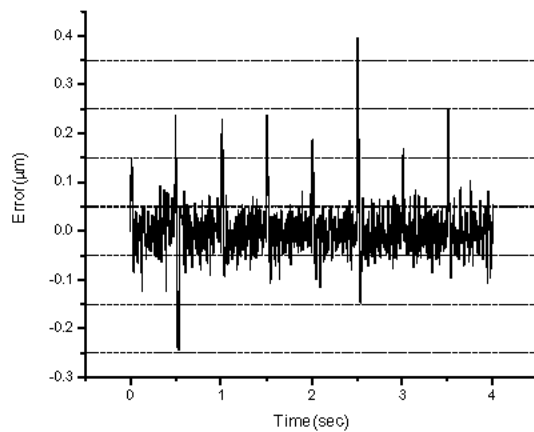


Fig.13 Tracking error of the piezoelectric actuator with nn_PID and inverse hysteresis model

5. 결론

본 논문에서는 실험을 통하여 압전소자의 재료적 특성인 히스테리시스 특성을 파악하였고, 변위와 입력전압 사이의 기하학적인 관계를 이용하여 역 히스테리시스 모델을 제시하였다. 역 히스테리시스 모델을 이용한 제어 입력은 곡선의 형태를 나타냈으며, 직선적인 궤적에서도 압전구동기가 직선적으로 구동할 수 있게 제어 전압을 출력하였다. 압전구동기를 역 히스테리시스 모델만 이용하여 구동을 하였을 경우 오차가 약 $\pm 0.5\mu\text{m}$ 를 가졌다. 단순한 PID 제어기 경우 오차가 $\pm 150\text{nm}$ 정도의 정밀도를 가졌으며 역 히스테리시스 모델과 PID 제어기를 병렬로 혼합하여 사용한 경우 오차가 약 $\pm 80\text{nm}$ 로 나타났다. 역 히스테리시스 모델과 PID 제어기 및 신경회로망을 이용한 경우 오차의 곡선이 $\pm 60\text{nm}$ 정도로 나타나게 되었으며 일반적인 PID 제어기 보다 $\pm 20\text{nm}$ 정도의 오차를 줄이게 되었다. 결과적으로 제안한 역 히스테리시스 모델과 PID 제어기 및 신경회로망을 사용할 때 에러 변화의 폭을 대폭 줄일 수 있었고 이를 통해 압전 구동기의 추종 성능을 향상시킬 수 있는 보다 나은 조건을 찾을 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 과학재단 지원 울산대학교 지역협력센터(RRC) 지원으로 수행되었으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Q.H. Max Meng, "A Neural Network Adaptive Controller For Robots with Unknown Dynamics", Proceeding of 1993 International Joint Conference on Neural Networks, pp.1769 -1772
2. S. Jung and S. Kim, "Improvement of scanning accuracy of PZT piezoelectric actuators by feedforward model-reference control", Precision Eng. Vol.16, No.1, pp.49 ~ 55, 1994
3. 정세용, "학습제어를 이용한 압전 구동기 시스템의 초정밀 위치제어", 울산대학교 1999 년
4. C. V. Newcomb and I. Flinn, "Improving the Linearity of Piezoelectric Ceramic Actuators", Electronics Letters, Vol.18, No.11, pp.442 ~ 444, May. 1982
5. H. Kaizuka and B. Sui, "A simple way to reduce hysteresis and creep when using piezoelectric actuators", Japan J, Appl. Phys, Vol.27, No.5, pp.773 ~ 776, 1988

6. 김정용, "역 히스테리시스 모델과 신경 회로망을 이용한 압전구동기의 정밀위치제어", 울산대학교 2001 년
7. 송재욱외 3 명, "압전구동기를 이용한 미소절삭 공구대의 정밀위치제어", 한국정밀공학회, 제 14 권, 제 11 호, pp.50-57, 1997