

역히스테리시스 모델과 PID-신경회로망 제어를 이용한 압전구동기의 정밀 위치제어

Precision Position Control of Piezoactuator Using Inverse Hysteresis Model and Neuro-PID Controller

김정용, 이병룡, 양순용, 안경관

(Jeung-Yong Kim, Byung-Ryong Lee, Soon-Yong Yang and Kyung-Kwan Ahn)

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. And feedforward-feedback controller is proposed to give a good tracking performance. The Feedforward controller is an inverse hysteresis model, base on neural network and the feedback control is implemented with PID control. 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.

Keywords : piezoelectric actuator, inverse hysteresis modeling, nonlinearity, neural network, precision control

I. 서론

최근 반도체 제조장치, 초정밀 공작기계, 정보기기 등의 분야에서 끊임없이 고정도, 고 정밀도가 요구되고 있다. 이처럼 위치결정기술은 산업전반에 포괄적으로 응용되는 기술로 현재는 서브마이크론 영역의 위치정밀도를 요구하고 있으며 21 세기 초에는 정밀도가 정밀가공분야에서는 10 nm, 초정밀 가공분야에서는 1 nm의 정도까지 도달 할 것으로 예상 되어 지고 있다. 반도체 제조장비의 경우 위치결정 정도가 수십nm 가 되어야 하므로 초정밀구동장치의 필요성이 증대되고 있다. 그러나 유압식, 공압식 액츄에이터는 유체의 특성상 서브 마이크로 이하의 정밀도를 얻는 것이 어렵다. 또한 전기식 액츄에이터는 제어기법을 사용하여 서브마이크로 이하의 정밀도를 얻는 것이 가능하나, 이것은 회전 운동은 쉽게 얻을 수 있지만 직선 변형은 복잡한 기계 구조를 이용해야 하는 단점이 있다. 따라서, 최근에는 형상기억합금, 정전 액츄에이터, 보이스코일 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 고응답성과 고강성 특성을 가지며 구동력과 전압의 제어에 의한 높은 분해능을 얻을 수 있으며 구동력이 크며 주파수 응답특성이 양호하다는 잇점을 가지고 있다. 반면에, 압전구동기는 강유전체이므로 가해진 전압에 대한 변위 응답이 히

스테리시스 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[3][10]은 압전구동기의 비선형특성이 크게 전기적 비선형 특성과 이력 현상에 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 이용하기 위해서는 특별히 고안된 전하구동증폭기 (charge drive amplifier)와 같이 하드웨어적인 요구사항이 많아지게 되고 변위의 감도가 떨어지게 되는 단점이 있다. 이 방법을 이용할 경우에 선형 제어이론을 이용할 수 있어 제어기는 단순해지는 반면에 하드웨어가 복잡해지게 된다. 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. 또, 다른 방법으로 페루프 제어를 이용한 것이 있다[6]. 이 방법은 제어기에 압전구동기의 히스테리시스 현상이 포함되어 있지 않으며 시스템의 불안정성을 야기할 수 있고 정밀도에도 한계가 있다. Ge 와 Jouaneh[7][11]은 프리사체의 모델(classical Preisach model)을 이용하여 압전구동기의 히스테리시스 현상을 모델링하고 이를 시스템에 적용하여 성능의 큰 향상을 보았다. 하지만, 이 방

논문접수 : 2002. 1. 31., 채택확정 : 2002. 11. 29.

김정용 : 울산대학교 기계공학과(oceankim@lycos.co.kr)

이병룡 : 울산대학교 기계·자동차공학부(brlee@mail.ulsan.ac.kr)

양순용 : 울산대학교 기계·자동차공학부(soonyy@mail.ulsan.ac.kr)

안경관 : 울산대학교 기계·자동차공학부(kkahn@mail.ulsan.ac.kr)

※ 본 연구는 "과학기술부-한국과학재단 지정 울산대학교 기계부품 및 소재특성평가 연구센터"의 지원에 의하여 연구되었습니다.

법은 일정한 주기 신호만을 추종할 수 있다는 단점을 가지고 있다. 정[8]은 압전구동 시스템을 하나의 Black Box 로 보고 신경회로망의 학습을 통해서 구동 정밀도를 높였다. 홍[9]은 0V~1V, 0V~2V..., 0V~10V 등의 여러 가지 패턴의 히스테리시스를 실험을 통하여 추출하고 신경회로망을 이용하여 히스테리시스를 학습하여 선형적인 제어를 하도록 하였다. 하지만, 학습 시킨 패턴만이 적용되는 단점이 있다.

본 논문에서는 압전구동기의 추종 성능 향상을 위해 비선형 히스테리시스특성, 즉 전압과 변위사이의 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 역 히스테리시스 모델은 비교적 복잡한 패턴의 구동에서도 만족할 만한 추종성능을 주었으나, 압전구동기의 반전점(turning point), 즉 전압이 상승하다가 하강한다든지 전압이 하강하다가 상승하는 영역에서는 추종성능이 다시 떨어지는 것을 확인하였다. 본 논문에서는 이러한 반전점에서의 추종성능을 개선하기 위하여 PID-신경회로망 제어기를 역 히스테리시스 모델과 병렬로 결합시키는 제어기를 사용하여 미지의 비선형 특성을 실시간(real-time)으로 학습하였다. 결과적으로, 제안된 제어기는 일반적인 PID 제어기를 이용한 경우보다 추종성능이 많이 향상될 수 있다는 것을 보였다.

II. 압전구동기의 히스테리시스 모델링

일반적으로 압전구동기의 동작에 영향을 미치는 비선형 요소는 히스테리시스와 드리프트 현상인데 압전구동 시스템의 위치 추종성능에 가장 큰 영향을 미치는 요소가 히스테리시스 특성이다. 히스테리시스에 의한 위치 오차는 압전구동기의 팽창거리가 클수록 증가하며, 팽창 거리의 15%정도의 위치오차가 발생하는 경우도 있다. 본 연구에서는 사용된 압전구동기의 히스테리시스 모델을 구하기 위하여 입력된 전압에 대한 출력변위값을 실험적으로 구하였다. 그림 1은 0V에서 1000V 까지 압전구동기에 전압을 증가시킨 다음, 1000V를 반전점으로 하여 다시 원래의 전압으로 감소시켰을 경우에 나타나는 히스테리시스 특성이다. 전반적으로 상승할 때 보다 하강할 때 비선형성이 증가하며, 대부분의 경우 전압을 완전히 하강시키더라도 초기 위치로 되돌아 오지 않는 특성을 보인다.

그림 2는 0V에서 500V까지 전압을 증가시킨 다음 0V까지 전압을 감소시켜서 메이저 루프(major loop)를 형성한 다음, 다시 400V까지 전압을 증가시키고 그후 100V까지 전압을 감소시킨 다음 다시 400V까지 전압을 증가시켜 메이저 루프 내부에 마이너 루프(minor loop)를 생성시킨 경우이다. 즉, 이중 히스테리시스 곡선의 특징을 보여주고 있다.

그림 3-1,2는 하강(상승) 반전점을 1000V에 고정시킨 반면 상승(하강) 반전점을 다양하게 변화시킨 경우의 히스테리시스 곡선들의 특성을 보여준다. 그림 3-1,2에서 알 수 있듯이 하강(상승) 반전점이 고정되었을 때 각 루프들의 상승(하강) 곡선은 다른 궤적을 따라 움직이지만, 각 루프들의 하강(상승)곡선은 같은 곡선을 경유하고 있다. 이상의 히스테

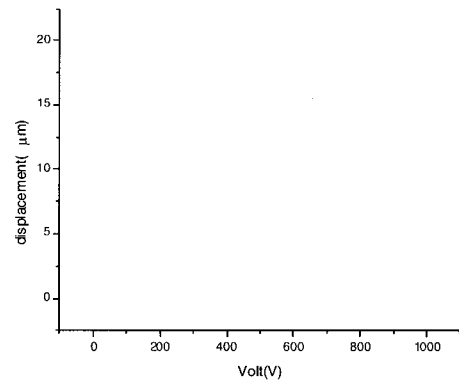


그림 1. 단일 히스테리시스 루프의 특성.
Fig. 1. Hysteresis nonlinearity of the piezoactuator.

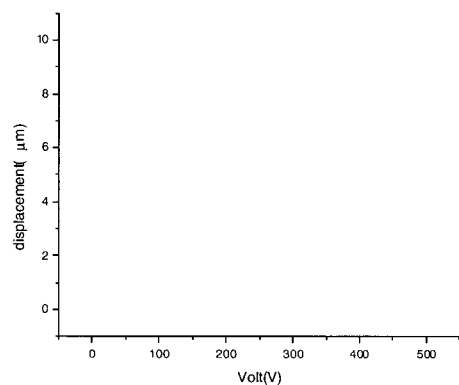


그림 2. 이중 히스테리시스 루프의 특성.
Fig. 2 Major and minor hysteresis loops.

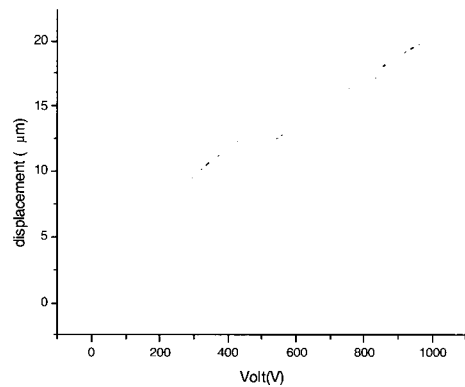


그림 3-1. 같은 하강반전점을 가지는 다수 히스테리시스 루프의 특성.

Fig. 3-1. Hysteresis loops with same upper reversal points.

리시스 특징으로부터 압전구동기는 다음과 같은 세가지의 특징을 가진다. 첫째 메이저 루프 안에 마이너 루프가 형성된다. 둘째, 마이너 루프 상의 곡선이 상승(하강) 하다가 하강(상승) 하면, 반전점을 기준으로 하여 마이너 루프의 하강(상승) 곡선의 단위 전압당 감소율은 메이저 루프의 하강(상승) 곡선의 단위전압당 감소율과 거의 같다. 이와 같은 특징은 마이너 루프상의 곡선이 하강(상승) 하다가 상승(하강) 할 때도 같은 특징을 가진다. 셋째, 같은 하강(상승) 반전점을 가지는

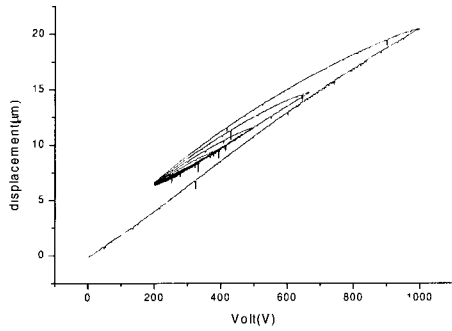


그림 3-2. 같은 상승반전점을 가지는 다수 히스테리시스 루프의 특성.

Fig. 3-2 Hysteresis loops with same lower reversal points.

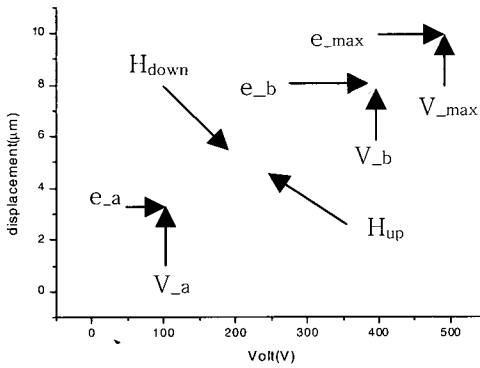


그림 4. 히스테리시스 모델.

Fig. 4. Parameters for mathematical modeling of hysteresis loops.

e : 현재의 변위, V : 현재의 전압, V_a : 하강도중 상승을 시작하는 전압, V_b : 상승도중 하강을 시작하는 전압, e_a : 마이너 루프 상승반전점에서의 변위, e_b : 마이너 루프 하강반전점에서의 변위, e_{max} : 메이저 루프의 최대변위, V_{max} : 메이저 루프의 최대 전압, H_{up} : 메이저 루프의 상승곡선 보간식, H_{down} : 메이저 루프의 하강곡선 보간식.

루프들의 하강(상승) 곡선은 같은 궤적상에 놓인다. 마찬가지로, 같은 상승(하강) 반전점을 가지는 루프들의 상승(하강) 곡선은 같은 궤적상에 놓인다. 따라서, 위에서 도출된 특징을 바탕으로 압전구동기의 히스테리시스 특성을 설명하는 전압과 변위 사이의 기하학적인 관계식을 도출할 수 있다.

그림 4 는 히스테리시스 곡선에 대한 모델링식을 유도하기 위하여 사용되는 파라미터들을 나타내고 있다. 사용된 파라미터들은 다음과 같이 정의된다.

아래의 (1)과(2)는 히스테리시스 곡선의 수학적 모델을 위하여 제안한 수식모델이다. (1)은 상승곡선 동안에 적용되며, (2)는 하강곡선 동안에 적용되는 식이다.

$$e = H_{up}(V - V_a) + e_a \tag{1}$$

$$e = H_{down}(V - V_b + V_{max}) + e_b - e_{max} \tag{2}$$

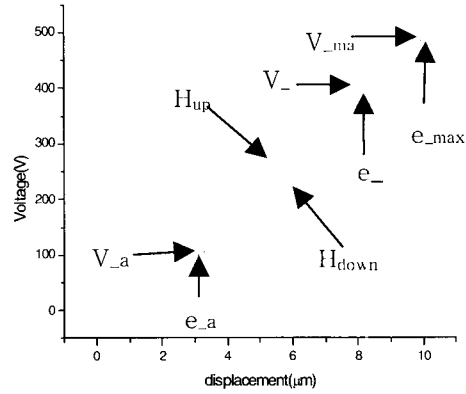


그림 5. 역 히스테리시스 모델.

Fig. 5. Inverse hysteresis model.

(1)과 (2)는 주어진 입력전압에 대하여 출력변위를 제공하므로 제어적인 관점에서는 적합한 식이 아니다. 일반적으로 제어시스템에서는 원하는 변위에 대응하는 전압이 제어입력이 되므로, (1)과 (2)는 다음과 같은 식으로 표현되어야 한다. 본 논문에서는 이와 같은 형태를 역히스테리시스 모델(inverse hysteresis model)이라고 부르기로 한다. (3)과 (4)는 각각 (1)과 (2)의 역히스테리시스 모델식이다.

$$V = V_a + H_{up}^l(e - e_a) \tag{3}$$

$$V = V_b - V_{max} + H_{down}^l(e_{max} - e + e) \tag{4}$$

III. 압전구동기의 제어기 구성

앞장에서 제시한 역히스테리시스 모델을 이용하여 히스테리시스의 비선형성을 보상하기 위한 부분과, 시스템이 가지고 있는 마찰이나 미지의 비선형요소를 보상하기 위하여 신경회로망 제어기와 PID 제어기를 병렬 구조로 결합하였다. 제안된 제어기의 구조는 그림 6 과 같다.

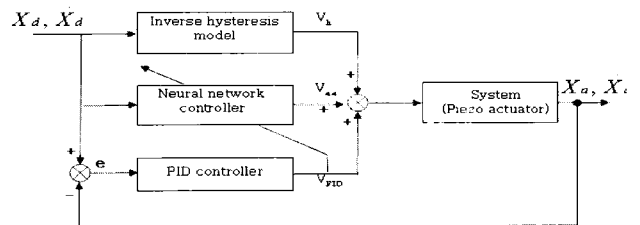


그림 6. 제어시스템의 블록선도.

Fig. 6. Proposed control system structure.

그림 6 에서 원하는 위치와 속도로 입력값이 주어지면 역히스테리시스 모델을 통하여 히스테리시스를 보상하는 전압 (V_a)이 나오게 되고 실제의 위치와 속도의 오차에 의해 비례-적분-미분(PID)제어기가 작동하여 피드백 제어 신호(V_{PID})가 출력된다. 신경회로망제어기는 PID 제어기의 출력값 V_{PID} 을 이용하여 실시간적으로 학습이 이루어지며, 학습을 통하여 오차를 줄이는 새로운 가중치 값을 구하게 된다. 학습을 위한 압전구동기의 오차 함수 $E(t)$ 를 아래와 같이 정의한다.

$$E(t) = \frac{1}{2} \|V_d(t) - V(t)\|^2 \quad (5)$$

여기서 $V_d(t)$ 는 t 번째 스텝에서의 출력층의 원하는 출력값이고, $V(t)$ 는 t 번째 스텝의 실제 출력값을 의미한다. 그러나 압전구동기의 정확한 수학적 모델링을 구할 수 없기 때문에 원하는 출력값 $V_d(t)$ 를 구할 수 없다. 원하는 출력값은 감독 학습 방법에서 목적패턴을 의미하는데, 이와 같이 목적패턴을 구할 수 없을 때는 비감독 학습 (Unsupervised Learning) 방법으로 학습해야 한다[12]. 비감독 학습방법으로 학습하는 신경제어기는 압전구동기의 출력 범위를 제외한 다른 특성에 관한 정보 없이 제어가 가능하다. (5)에서 $V_d(t)$ 를 구할수 없기 때문에 비례-적분-미분(PID) 제어기의 출력 $V_{PID}(t)$ 를 이용하여 학습오차 함수를 다음과 같은 식으로 설정하였다.

$$E(t) = \frac{1}{2} \left\| \sum_{k=1}^n V_{PID}(t) \right\|^2 \quad (6)$$

위에서, $V_{PID}(t)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$V_{PID}(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (7)$$

그리고, (6)에서 $V_{PID}(t)$ 의 값이 0 이 되면 즉, 피드백 오차가 0 이 되면 E(t)는 0 이 되므로 (6)은 적절한 학습오차 함수라고 할 수 있다. (6)의 학습오차 함수를 이용하여 출력층과 은닉층의 델타값을 구하면 (8)과 (9)와 같이 구해진다.

출력층 :
$$\delta_k = -\frac{\partial E}{\partial S_k} = O_k(1 - O_k)V_{PID} \quad (8)$$

은닉층 :
$$\delta_j = -\frac{\partial E}{\partial S_j} = \sum_{k=1}^m \delta_k W_{kj} O_j(1 - O_j) \quad (9)$$

그리고 신경회로망 내의 각 노드를 연결하는 네트워크의 가중치의 변화는 다음과 같이 구해진다[13].

$$\Delta W_{kj}(t) = \eta \delta_k O_j \quad (10)$$

$$\Delta W_{ji}(t) = \eta \delta_j O_i \quad (11)$$

신경회로망 제어기는 PID 제어기의 오차가 0 에 근접할 때 까지 학습에 의하여 네트워크의 가중치들은 변화게 되고, 학습을 완료한 후에는 신경회로망내의 네트워크 가중치의 값은 고정된다. 결론적으로, 본 논문에서 제안된 제어기는 역 히스테리시스 보상기, 학습된 신경회로망제어기 및 PID 제어기로 구성되며, 각 제어기의 합산된 값이 압전구동기의 제어력으로 입력된다.

IV. 실험

1. 실험장치구성

실험에서 사용된 장치는 아래의 그림 7 과 같이 구성되어 있다. 실험장치는 주어진 목표함수를 추정하기 위하여 구성되어 있다. 목표를 정확하게 추정하기 위하여 제어된 출력데이터는 D/A 변환기를 지나고, 압전구동기 증폭기에 의하여

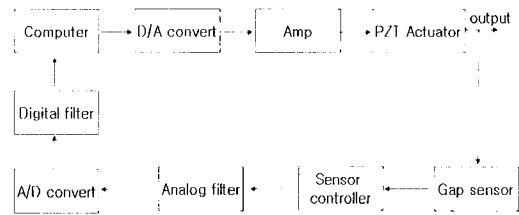


그림 7. 제어시스템 장치구성.
Fig. 7. Control system structure.

증폭된 전압으로 압전구동기를 구동시키게 된다. 변위정보는 갭 센서에 의하여 A/D 변환기를 거쳐서 제어용 컴퓨터에 전달된다.

압전구동기의 위치제어 실험을 위하여 사용된 각 요소에 대한 사양은 표 1 과 같다. 실험에 사용한 압전구동기, 증폭기 변위센서 및 센서제어기는 모두 독일의 PI(Physik Instrumente)사의 제품을 사용하였다. 표에서 보는 바와 같이 압전구동기의 최대 스트로크는 20 μ m 이고, 변위를 측정하기 위하여 25 μ m~75 μ m 범위내에서 nm 정도의 정밀도를 가지는 갭센서를 사용하였다. 압전구동기를 구동하기 위한 Amp 는 1000V 까지의 출력을 낼 수 있다. A/D 및 D/A 변환기는 어드벤처사의 PCL-818L 모델을 사용하였다.

2. 역히스테리시스 모델을 이용한 궤적 추종실험

(3)과(4)를 이용하여 압전구동기의 역히스테리시스 특징을 모델링 하기 위해서는, 먼저 바깥 쪽 메이저 루프 (major loop)의 모델식을 구해야 한다. 그림 8 은 압전구동기에 0V 에서 500V 까지 전압을 증가한 다음 0V 로 전압을 감소시켜 전압과 변위의 관계를 실험적으로 구한 뒤, 발생하는 메이저루프에 대한 전압-변위 데이터를 3 차 다항식으로 보간한 식을 보여주고 있다. 이 식을 이용하여 (3)과 (4)와 같은 역히스테리시스 모델식을 구하는 것이 가능하다. 구해진 역 히스테리시스 모델식의 성능을 알아보기 위하여 모델식으로 부터 구한 곡선과 실제 실험으로부터 얻은 곡선을 중첩하여 그림 9 에 나타내었다.그림에서 보는 바와 같이 역히스테리시스 모델의 수식출력 값은 실제 실험치와 거의 일치하는 것을 볼 수 있다.

그림 10 은 역히스테리시스 모델을 이용하여 톱니형의 직선 변위를 추종한 실험의 결과이다.

그림 10 에서 실선으로 표시된 부분이 원하는 궤적이고 점선으로 표시된 부분이 역히스테리시스 모델을 이용한 경우의 추종결과이다. 그리고 일점쇄선으로 표시된 부분은 역히스테리시스 모델을 사용하지 않은 경우의 추종결과이다.

표 1. 제어장치 각 요소의 사양.

Table 1. Specifications of control system.

	모델명	비고
압전구동기	PI, P-245.20	최대 변위:20 μ m
고전압 증폭기	PI, E471.00	0V~1000V
변위 센서	PI, D-050.00	25 μ m~75 μ m
센서 제어기	PI, E-509.C1	1 channel
A/D,D/A 보드	ADVANTECH, PCL-818L	A/D16 ch, D/A 2ch

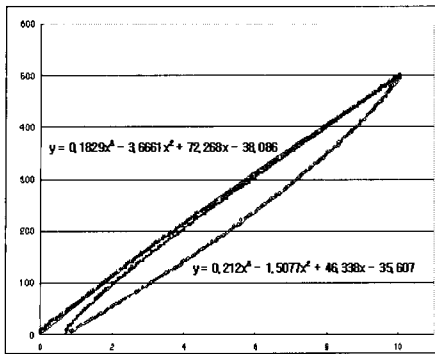


그림 8. 실험데이터에 의한 페이저루프의 보간식.
Fig. 8 Curve-fitting equation for the experimental hysteresis loop.

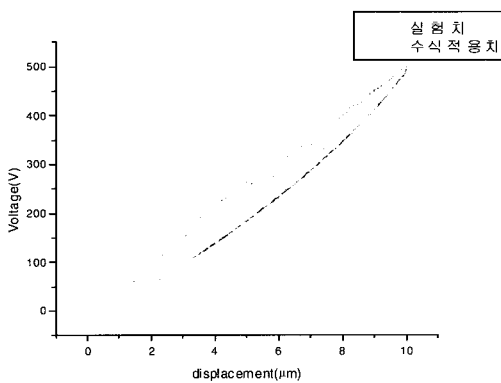


그림 9. 역 히스테리시스 모델의 수식 및 실험치 비교.
Fig. 9 Comparison of inverse hysteresis curve from model and experiment.

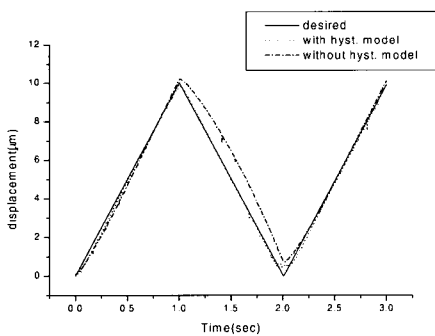


그림 10. 역 히스테리시스 모델을 이용한 동일한 반전점을 가진 궤적 추종실험.
Fig. 10. Trajectory tracking of the piezoactuator with and without inverse hysteresis model.

그림 10에서 알 수 있듯이 역히스테리시스 모델을 이용하였을 때 압전구동기는 원하는 궤적을 잘 추종하였다.

그림 11은 높이가 다양한 툽니형태의 직선변위에 대한 추종실험이다. 이 경우 역시 역히스테리시스 모델을 이용한 경우 궤적 추종성능이 양호함을 알 수 있다. 그러나, 그림 10과 그림 11의 예에서 보는 바와 같이, 변위의 기울기가 바뀌는 부분 즉, 반전점에서 큰 추종오차가 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서, 역히스테리시스 모델만을 이용하여 다양한

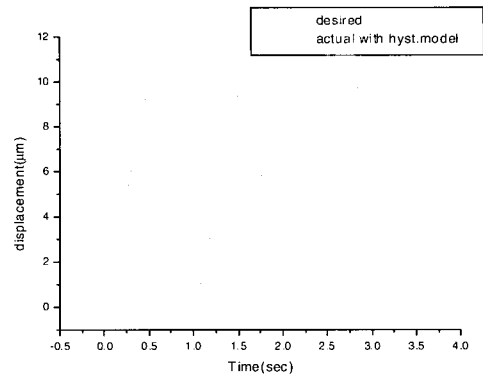


그림 11. 역 히스테리시스 모델을 이용한 다양한 반전점을 가진 궤적추종실험.

Fig. 11. Tracking result of the piezoelectric actuator with inverse hysteresis model for complex trajectory.

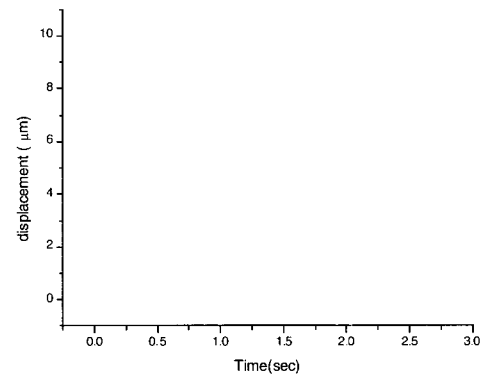


그림 12. 추종요구 궤적.
Fig. 12. Desired trajectory to be tracked.

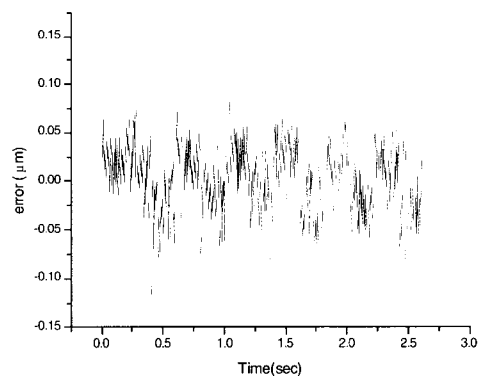


그림 13. PID 제어기만을 이용한 경우의 궤적추종 오차.
Fig. 13. Tracking error with simple PID control.

형태의 궤적을 정확하게 추종하는 것은 한계가 있다.본 논문에서는 역히스테리시스 모델을 이용한 보상기에 PID-신경회로망제어기를 병렬로 추가하여 압전구동기의 추종성능을 높이도록 하였다.

3. 역히스테리시스 모델과 PID-신경회로망제어기를 이용한 궤적추종실험

그림 6과 같이 제안된 복합제어기를 사용하기 위해서는 신경회로망제어기가 적절하게 학습이 되어야 하는데, 본 논문에서 사용된 신경회로망은 입력층, 은닉층 및 출력층으로

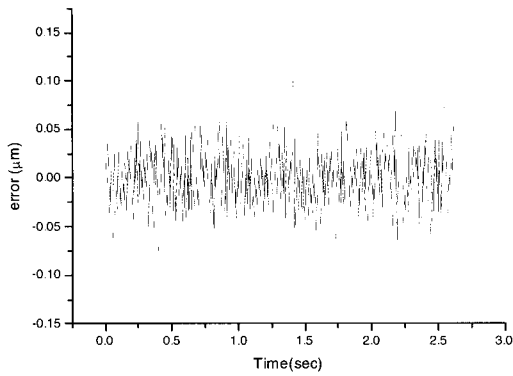


그림 14. 역히스테리시스 모델과 PID 제어기를 이용한 경우의 궤적추종 오차.

Fig. 14. Tracking error with simple PID control and hysteresis compensation.

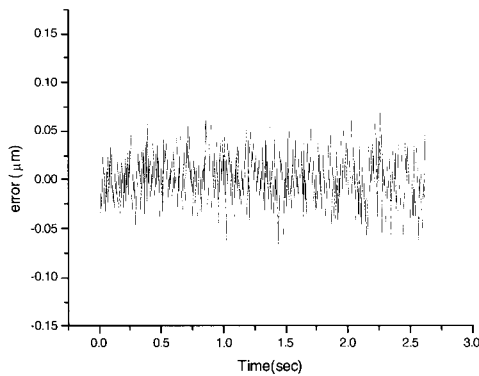


그림 15. 역히스테리시스 모델과 PID-신경회로망 제어기를 이용한 경우의 궤적추종 오차.

Fig. 15. Tracking error with simple neuro-PID control and hysteresis compensation.

구성된 회로를 이용하였다. 그리고, 실시간으로 신경회로망을 학습하는데 소요되는 계산시간을 줄이기 위하여 은닉층의 노드수를 8 개 사용하였다. 신경회로망을 학습하기 위하여 주기가 1 초인 정현파를 이용하였고, PID 제어기의 추종오차가 0 의 값에 접근할 때까지 학습하였다. 제안된 복합제어기의 추종성능을 알아보기 위하여, 복합제어기와 다른 제어기와의 추종성능을 비교하기 위하여 다음과 같은 실험을 수행하였다. 그림 12 는 추종요구 궤적으로서 변위가 5 μm 와 10 μm 사이에서 반복적 증감하는 직선궤적의 경우이다. 그림 13 은 역히스테리시스 모델을 사용하지 않고 단순히 PID 제어기만을 사용하여 피드백 제어를 한 경우의 추종오차를 나타낸다. 그림 14 는 역히스테리시스 모델과 PID 제어기를 이용한 경우의 궤적추종 오차이고, 그림 15 는 역히스테리시스 모델과 PID-신경회로망 제어기를 이용한 경우의 궤적추종 오차를 나타내고 있다.

위의 비교 실험결과를 분석해 보면 다음과 같다. 그림 14 에서 알 수 있듯이 역 히스테리시스 모델과 PID 제어기를 사용한 경우, 궤적의 상승과 하강에 따른 오차의 변화가 많이 개선된 것을 볼 수 있으며, 전반적으로 추종오차가 $\pm 75\text{nm}$ 정도가 되는 것을 알 수 있다. 그림 15 는 역히스테리시스

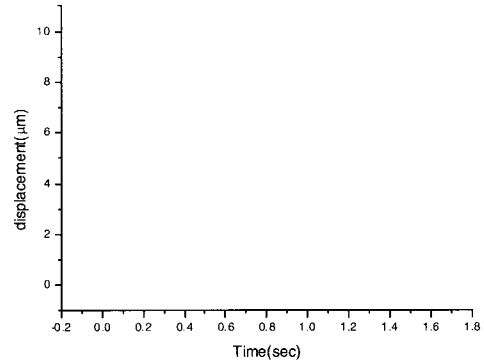


그림 16. 다양한 반전점을 가지는 추종요구 궤적.

Fig. 16. Desired tracking trajectory with diverse peak points.

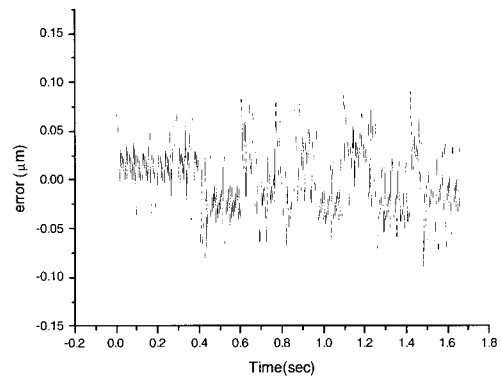


그림 17. PID 제어기를 이용한 경우의 궤적추종 오차.

Fig. 17. Tracking error in using PID controller.

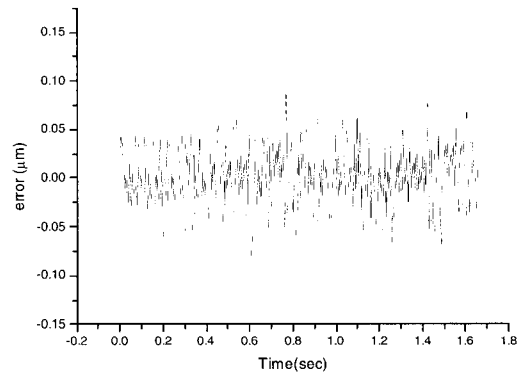


그림 18. 역히스테리시스 모델과 PID 제어기를 이용한 경우의 궤적추종 오차.

Fig. 18. Tracking error in using PID controller with inverse hysteresis model.

모델과 PID-신경회로망을 이용한 궤적 추종오차를 보여주고 있으며, 전반적으로 약 $\pm 50\text{nm}$ 오차를 가지고 궤적을 추종하는 것을 알 수 있다. 따라서, 제안된 제어기가 다른 제어기에 비하여 우수한 추종성능을 보여주고 있음을 확인하였다.

이번에는 추종요구궤적을 그림 16 과 같이 선정하였다. 이 경우는 그림 12 의 경우보다는 복잡하고 일반적인 경우의 궤적이라고 할 수 있다. 마찬가지로 3 가지의 제어기에 대한 추종성능을 비교검토하였다. 그림 17 은 다양한 반전점을 가지는 궤적을 단순한 PID 제어기를 이용하여 추종실험을 하였을 때

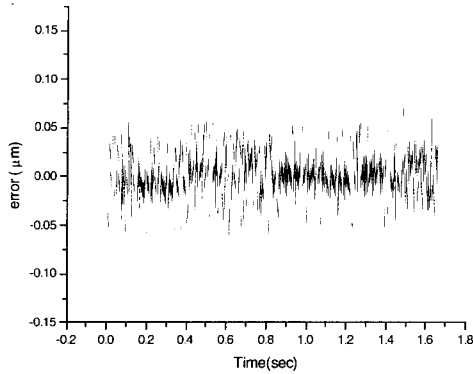


그림 19. 역히스테리시스 모델과 PID-신경회로망 제어기를 이용한 경우의 궤적추종 오차.

Fig. 19. Tracking error in using neuro-PID controller with inverse hysteresis model.

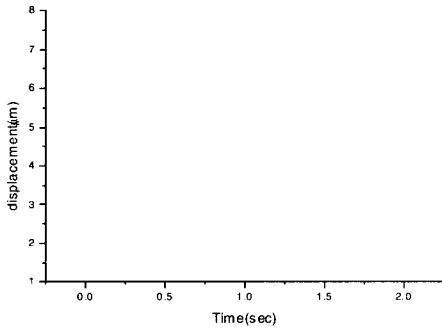


그림 20. 사인곡선형태의 추종요구 궤적.

Fig. 20. Desired tracking trajectory with sinusoidal pattern.

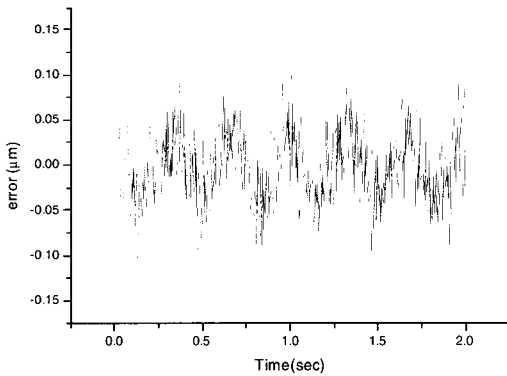


그림 21. PID 제어기를 이용한 경우의 궤적 추종오차.

Fig. 21. Tracking error in using PID controller.

추종오차를 보여 주는 그래프이다. 그림 18 은 역히스테리시스 모델과 PID 제어기를 이용하였을 때 오차 그래프이다. 그림 18 에서 볼 수 있듯이 궤적에 따른 오차의 변화가 없어졌으며 스트로크의 길이가 작을 때 오차도 작아지는 것을 볼 수 있다. 그림 19 는 다양한 반전점을 가지는 궤적을 역히스테리시스 모델과 PID-신경회로망 제어기를 이용하여 추종실험을 한 경우 오차 그래프이다. 역히스테리시스 모델과 PID-신경회로망 제어기를 이용한 경우가 역시 우수한 성능을 보이며, 약 $\pm 50\text{nm}$ 정도의 오차를 가지고 궤적을 추종한 것을

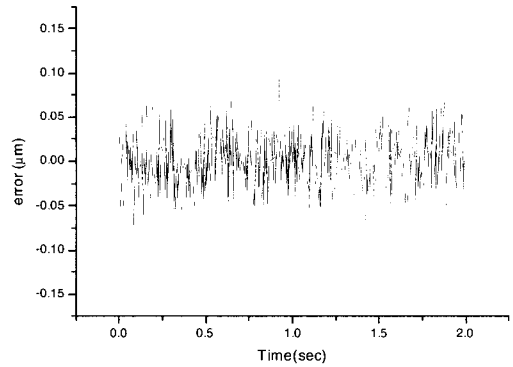


그림 22. 역히스테리시스 모델과 PID 제어기를 이용한 경우의 궤적 추종오차.

Fig. 22. Tracking error in using PID controller with inverse hysteresis model.

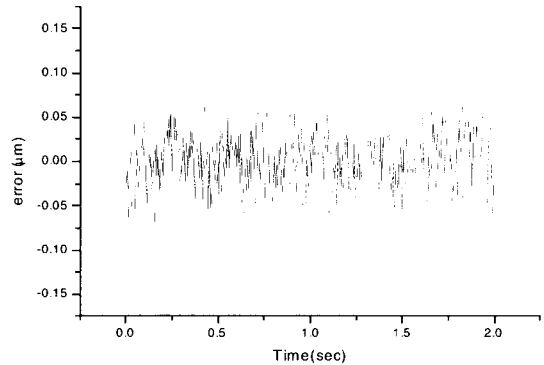


그림 23. 역히스테리시스 모델과 PID-신경회로망 제어기를 이용한 경우의 궤적 추종오차.

Fig. 23. Tracking error in using neuro-PID controller with inverse hysteresis model.

알 수 있다.

앞에서 이루어진 실험들에서는 궤적이 직선적 변하고, 또한 초기변위의 값이 0 이다. 이 번 실험에서는 시작변위가 0 이 아니고, 궤적 또한 직선이 아닌 사인곡선을 추종요구 궤적으로 설정하였다. 추종요구 궤적은 초기점이 $4.5\mu\text{m}$, 진폭이 $6\mu\text{m}$ 그리고 주기가 3Hz 인 사인 곡선으로 그림 20 과 같다. 이 실험의 목적은 변위가 0 이 아닌 지점에서 시작할 때, 역히스테리시스 모델이 어느 정도의 보정능력을 가지는지 판단하는 것이다.그림 21 은 단순한 PID 제어기를 이용하여 사인곡선을 추종하는 경우의 추종오차 그래프이다. 그림 22 는 역히스테리시스 모델과 PID 제어기를 이용하여 사인곡선을 추종하는 경우의 추종오차 그래프이다. 그림 23 은 역히스테리시스 모델과 PID-신경회로망 제어기를 이용한 경우의 추종오차 그래프이다. 그림 22 에서 볼 수 있듯이 역히스테리시스 모델과 PID 제어기를 사용한 경우가 PID 제어기만 사용한 그림 21 보다 성능이 우수함을 보이고, 오차 값도 약 $\pm 75\text{nm}$ 의 수준으로 줄어 들었다.그리고, 그림 23 에서 보는 바와 같이 역히스테리시스 모델과 PID-신경회로망 제어기를 복합적으로 사용한 경우 오차가 더욱 줄어 들었으며, 오차의 수준은 약 $\pm 50\text{nm}$ 정도이다. 이상의 실험내용을 검토해 보면, 단순히 PID 제어기를 사용하는 경우보다 PID 제어기에 역히스

테리시스 보상기를 추가한 경우가 성능이 좋아졌다. 그리고, 역히스테리시스가 보상하기 힘든 오차성분, 예를 들면 역히스테리시스 모델링 오차 혹은 미지의 비선형 마찰등의 요소들이 신경회로망을 이용한 실시간 학습에 의하여 감소될 수 있다는 점을 본 연구에서 보였다.

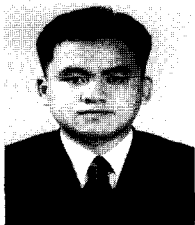
V. 결론

본 논문에서는 압전구동기가 가지는 최대의 비선형 요소인 히스테리시스 특성을 보상하기 위하여 역히스테리시스 모델링을 도입하였다. 그리고, 다양한 실험을 통하여 단순한 PID 제어기 보다는 역히스테리시스 모델링에 입각한 보상기를 추가하는 것이 추종성능을 매우 향상시킨다는 점을 보였다. 그러나, 제안된 역히스테리시스 수식모델이 실제 압전구동기의 히스테리시스 특성을 완전히 표현하지 못할 뿐더러, 히스테리시스 외에 비선형 마찰등의 성분도 압전구동기에 추종오차를 발생시키는 요소이다. 따라서, 본 논문에서는 역히스테리시스 모델의 모델링 오차 및 미지의 비선형 성분들을 줄이기 위하여 신경회로망 제어기를 병렬 형태로 추가하였다. 그리고, 이러한 방법이 효과가 있음을 다양한 실험을 통하여 입증하였다. 본 논문에서 관찰되는 추종오차는 ± 50 nm 수준에 불과하지만 탄성힌지등과 같은 변위 축소기구를 이용한다면, 수 nm 수준까지 추종오차 수준을 쉽게 낮출 수 있을 것으로 본다.

참고문헌

[1] 박창엽, "세라믹스", 김영출판사, 1987
 [2] Z. X. Wang, K. Jouaneh and D. Dornfield, "Design and characterization of a linear motion piezoelectric microactuator", *IEEE Conf. Robotics and Automation*, pp. 1710-1715,

1989.
 [3] S. Jung and S. Kim, "Improvement of scanning accuracy of PZT piezoelectric actuators by feed forward model-reference control", *Precision Eng.* Vol. 16, No. 1, pp. 49-55, 1994.
 [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] M. Tanaka, Z. W. Jiang and S. Chonan, "Force control of a flexible finger with distributed force sensors and piezoelectric actuators", *Proceedings of the 1st International Workshop on Advanced Mechatronics*, pp.237-241, 1995.
 [7] P. Ge and M. Jouaneh, "Tracking control of a piezoceramic actuator", *IEEE transactions on control systems technology*, Vol. 4, No. 3, 1996.
 [8] 정세웅, "학습제어를 이용한 압전구동기 시스템의 초정밀 위치제어", 울산대학교 1999.
 [9] 홍성룡 "히스테리시스를 보상을 이용한 압전구동기의 정밀 위치제어" 울산대학교 2000.
 [10] 정승배, 박준호, 김승우, "현미경을 위한 압전구동기의 비선형 모델링", 대한기계학회 논문집, 제 18 권, 제 9 호, pp. 2272-2283, 1994.
 [11] P. Ge and M. Jouaneh, "Modeling hysteresis in piezoceramic actuator," *Precision Eng.*, Vol. 17, pp. 211-221, 1995.
 [12] 이상원, "기계 신경망", *Ohm Company*, 1995.
 [13] S.Haykin, "Neural Networks", *Macmillan*, 1994.
 [14] S. T. Smith and D. G. Chetwynd, "Foundation of ultraprecision mechanism design", *Gordon and Breach Science Publishers*, pp. 99-100, 1994.



김정용

1977년 12월 28일생. 2000년 울산대학교 기계공학과 졸업. 2002년 동 대학원(석사). 2002년~현재 ㈜삼주기계 근무. 관심분야는 강인제어, 압전구동기의 초정밀 위치제어.

양순용

제어 · 자동화 · 시스템공학 논문지 제 8 권 제 9 호 참조.

이병룡

제어 · 자동화 · 시스템공학 논문지 제 8 권 제 9 호 참조.

안경관

제어 · 자동화 · 시스템공학 논문지 제 8 권 제 9 호 참조.