

히스테리시스 앞먹임과 신경회로망을 이용한 압전 구동기의 정밀 위치제어

김형석*, 이수희*, 이병룡#, 안경관**

Precision Position Control of Piezoelectric Actuator Using Feedforward Hysteresis Compensation and Neural Network

HyoungSeog Kim*, Soo Hee Lee*, ByungRyong Lee#, KyungKwan Ahn**

ABSTRACT

This work proposes a new method for describing the hysteresis non-linearity of a piezoelectric actuator. The hysteresis behaviour of piezoelectric actuators, including the minor loop trajectory, are modeled by geometrical relationship between a reference major loop and its minor loops. This hysteresis model is transformed into inverse hysteresis model in order to output compensated voltage with regard to the given input displacement. A feedforward neural network, which is trained by a feedback PID control module, is incorporated to the inverse hysteresis model to compensate unknown dynamics of the piezoelectric system. To show the feasibility of the proposed feedforward-feedback controller, some experiments have been carried out and the tracking performance was compared to that of simple PID controller.

Key Words : piezoelectric actuator(압전구동기), hyseresis(히스테리시스), nonlinearty(불연속성), feedforward(앞먹임), inverse hysteresis-modeling(역히스테리시스 모델링), neural network(신경망회로)

1. 서론

현재 많이 사용되고 있는 서보 액츄에이터는 공압식, 유압식, 전기식 액츄에이터가 있는데 유압식, 공압식 액츄에이터는 유체의 특성상 서브마이크로 이하의 정밀도를 얻는 것이 어렵다. 전기식 액츄에이터는 제어기법을 사용하여 서브마이크로 이하의 정밀도를 얻는 것이 가능하나, 이것은 회전 운동은 쉽게 얻을 수 있지만 직선 변형은 복잡한 기계 구조를 이용하여

얻어야 하는 단점이 있다. 이에 반해, 압전 구동기는 고응답성, 고강성, 큰 구동력, 높은 분해능, 그리고 양호한 주파수 응답특성을 가지고 있어 서브마이크로 범위의 정밀도를 쉽게 얻을 수 있으며 또한 직선 변위도 다른 기구를 이용하지 않고 바로 얻을 수 있는 기구적 장점을 가지고 있다. 그러나 압전구동기는 강유전체이므로 구동 전압에 대한 변위 응답이 히스테리시스 성질을 가지며 이는 추종제어 정밀도를 떨어뜨리는 원인이 된다. 압전구동기의 이러한 비선형성을

* 접수일: 2004 년 8 월 31 일; 게재승인일: 2005 년 4 월 15 일

* 울산대학교 기계자동차공학과 대학원

교신저자: 울산대학교 기계자동차공학부

E-mail brlee@ulsan.ac.kr Tel. (052) 259-2147

** 울산대학교 기계자동차 공학부

보정하기 위한 연구가 지금까지 꾸준히 진행되어 왔다. S. Jung 과 S. Kim¹ 은 압전구동기의 비선형 특성이 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 Flinn² 은 변위를 일으키는 제어 입력으로 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 많아 지게 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 제안하였다³. 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 제어기를 이용한 것이 있다⁴. 이 방법은 제어기에 압전구동기의 히스테리시스 현상이 포함되어 있지 않으며 시스템의 불안정성을 야기할 수 있고 정밀도에도 한계가 있다. Ge 와 Jouaneh⁵ 는 프라이작의 모델(classical Preisach model)을 이용하여 압전구동기의 히스테리시스 현상을 모델링하고 이를 시스템에 적용하여 성능의 큰 향상을 보았다. 하지만, 이 방법은 일정한 주기 신호만을 추종할 수 있다는 단점을 가지고 있다. Kim⁶ 은 압전구동 시스템을 하나의 Black Box 로 보고 신경회로망의 학습을 통해서 구동 정밀도를 높였다. Hong⁷은 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. 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 향상 될 수 있다는 것을 보였다.

2. 역 히스테리시스 모델링

2.1 압전구동기의 히스테리시스 거동특성

압전구동기의 히스테리시스 곡선은 인가전압을 증가시킬 때의 상승곡선과 감소시킬 때의 하강곡선으로 이루어 지는 하나의 루프를 이루며 특정한 기하학적 형상을 가지고 있다.

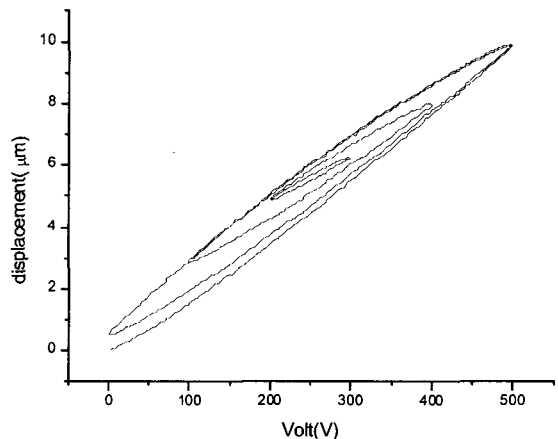


Fig. 1 Complex hysteresis nonlinearity of the piezoactuator

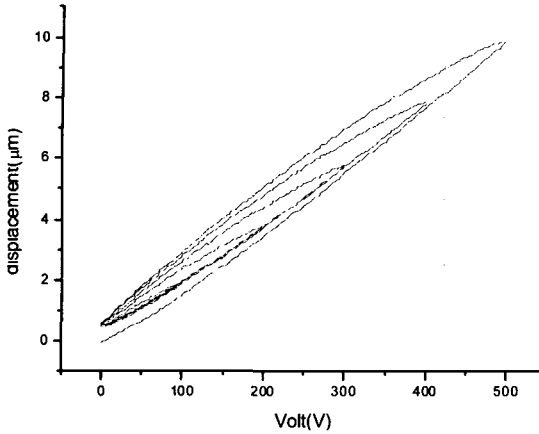


Fig. 2 Hysteresis loops with same lower reversal points

Fig. 1 은 다양한 반전 점을 가진 히스테리시스 특성 곡선을 보여준다. Fig. 2 는 동일한 하강 반전점을 가진 경우의 히스테리시스 특징을 보여준다. Fig. 2 에서 알 수 있듯이 동일한 하강 반전점을 지난 후 상승할 때 각각의 상승곡선은 유사한 기울기를 가진다.

위의 특징들을 종합해 보면 다음과 같이 세가지로 요약할 수 있다.

- 첫째, 큰 루프 안에서 작은 루프가 형성이 된다.
- 둘째, 상승(하강) 도중에 하강(상승)을 하면 곡선이 반전되는 점을 기점으로 하여 밖의 큰 루프와 비슷한 형상으로 구동하게 된다.
- 셋째, 상승(하강) 할 때 반전되는 점이 같을 때 같은 상승(하강) 곡선을 따라 구동이 된다.

2.2 압전구동기의 히스테리시스 모델링

앞 절에서 언급한 히스테리시스 궤적의 특징으로부터 압전구동기의 히스테리시스 모델을 수식화 할 수 있다. 히스테리시스 곡선이 반전 점을 기점으로 큰 루프의 계형과 유사하다는 점과 동일 반전 점 통과 후 같은 곡선을 따라 구동하는 특성을 이용해 인가전압과 압전구동기 변위 사이의 근사 모델을 구하였다. Fig. 3 은 압전구동기의 전형적인 히스테리시스 궤적을 나타내며 수식화 하기 위하여 특징점에 대한 변수들을 표기하였다. 사용된 변수들은 다음과 같다.

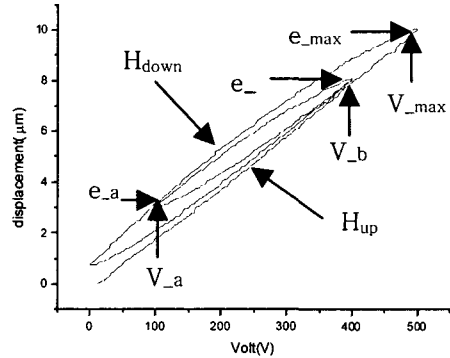


Fig. 3 Parameters for mathematical modeling of hysteresis

e : 현재의 변위, V_a : 상승도중 하강을 시작하는 전압, V_b : 하강도중 상승을 시작하는 전압, e_{max} : 하강곡선에서 최대 큰 변위, e_b : 상승도중 하강을 시작하는 변위, e_a : 하강도중 상승을 시작하는 변위, e_{max} : 하강곡선에서 최대 큰 변위, V_{max} : 하강곡선에서 최대 전압, H_{up} : major loop 상승 보간식, H_{down} : major loop 하강 보간식

Fig. 3 에서 가장 바깥쪽의 루프를 major loop 라고 하고, 안쪽의 루프를 minor loop 라고 한다. major loop 모델은 상승 구간과 하강 구간 실험 데이터를 이용해 각각 다항식으로 보간할 수 있다. minor loop 모델은 바깥쪽 major loop 의 수식을 반전 점을 기점으로 평행이동을 시킨 수식을 적용시켜 구한다. 식 (1)은 상승시의 minor loop 의 모델, 식 (2)는 하강할 때의 minor loop 의 모델이 된다.

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

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

2.3 역 히스테리시스 모델링

히스테리시스의 모델은 입력전압이 독립변수가 되고 변위가 입력전압에 대한 종속 변수가 된다. 따라서 히스테리시스 모델을 이용하면 입력전압에 대한 압전구동기의 변위를 알 수 있다. 하지만 실제 시스템을 제어하기 위해서는 원하는 변위가 제어 목표인 독립변수가 되어야 하고 그에 따른 전압이 제어 대상인 종속변수가 되어야 하므로 major loop 보간식을 역으로 좌표 변환한다.

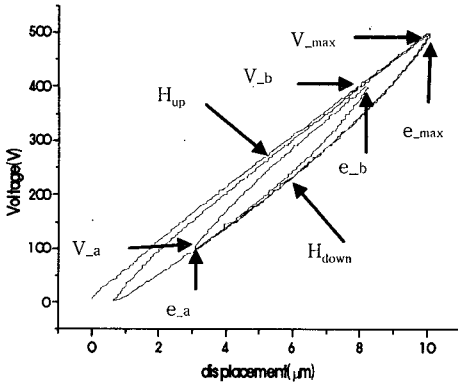


Fig. 4 Inverse hysteresis model

일반적으로 이러한 형을 역 히스테리시스 모델이라고 말한다. Fig. 4 은 좌표 변환한 히스테리시스 루프를 나타내며 아래의 식 (3)과 식 (4)는 식 (1)과 식 (2)를 역 히스테리시스 모델로 바꾼 표현식이다.

$$V = V_a + H_{up}^{-1}(e - e_a) \quad (3)$$

$$V = V_b - V_{max} - H_{down}^{-1}(e_{max} - e_b + e) \quad (4)$$

3. 압전구동기의 제어기

압전구동기의 히스테리시스 비선형성을 보상하기 위해 2.3 절에서 제시한 역히스테리시스 모델과 시스템이 가지고 있는 마찰이나 미지의 비선형요소를 보상하기 위한 신경회로망 제어기 그리고 PID 제어기를 병렬 구조로 결합하였다. 제안된 제어기의 구조는 Fig. 5 과 같다.

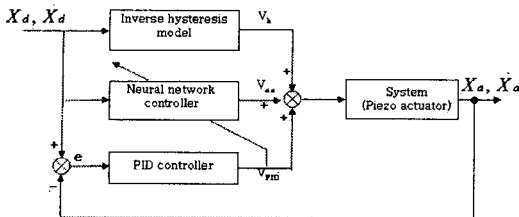


Fig. 5 Proposed control system structure

Fig. 5 에서 원하는 위치와 속도로 입력값이 주어지면 역 히스테리시스 모델을 통하여

히스테리시스를 보상하는 전압(V_h)이 출력되고 측정된 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 실시간으로 학습이 이루어지며, 학습을 통하여 오차를 줄이는 새로운 가중치 값을 구하게 된다. 학습을 위한 압전구동기의 오차 함수 $E(t)$ 를 아래와 같이 정의한다.

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

여기서 $V_d(t)$ 는 t 번째 스텝에서의 출력층의 원하는 출력값이고, $V_a(t)$ 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 목적 패턴을 구할 수 없을 때는 비감독 학습 (unsupervised learning) 방법으로 학습해야 한다. 비감독 학습방법으로 학습하는 신경제어기는 압전구동기의 출력 범위를 제외한 다른 특성에 관한 정보 없이 제어가 가능하다. 식 (5)에서 $V_d(t)$ 를 구할수 없기 때문에 비례-적분-미분(PID) 제어기의 출력 $V_{PID}(t)$ 를 이용하여 학습오차 함수를 다음과 같이 정의하였다.

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

위 식에서, $V_{PID}(t)$ 는

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

이다. 식 (6) 에서 $V_{PID}(t)$ 의 값이 “0”이 되면 즉, 피드백 오차가 “0”이 되면 $E(t)$ 는 “0”이 되므로 식 (6)은 적절한 학습오차 함수라고 할 수 있다. 학습오차 함수를 이용한 출력 층과 은닉 층의 델타 값은 아래 식 (8), (9)과 같이 표현된다.

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

은닉층:

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

신경회로망 내의 각 노드를 연결하는 네트워크의 가중치의 변화는 다음과 같다.

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

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

신경회로망 제어기는 PID 제어기의 오차가 “0”에 근접할 때까지 학습에 의하여 네트워크의 가중치를 조정하고, 학습을 완료한 후 가중치의 값은 고정된다. 결론적으로, 본 논문에서 제안된 제어기는 역 히스테리시스 보상기, 학습된 신경회로망제어기 및 PID 제어기로 구성되며 각 제어기의 합이 압전구동기의 제어력으로 입력된다.

4. 실험

4.1 실험장치구성

Fig. 6 은 전체적인 실험의 구성도를 나타낸 것으로, 임의의 변위에 대한 제어 입력 전압이 컴퓨터에서 출력되면 D/A 변환기(PCL-818)를 거쳐 고전압 증폭기에서 100 배 증폭된다. 증폭된 전압은 압전구동기(PZT actuator)의 구동력으로 작용하여 변위를 발생시키고 이 값을 정전용량 변위 센서(Capacitive sensor)가 측정한다. 측정된 값은 변위센서 제어기를 거쳐 A/D 변환기를 통해 다시 컴퓨터로 입력된다. 이 과정을 통해 매 스텝마다 제어 전압을 발생시키게 된다.

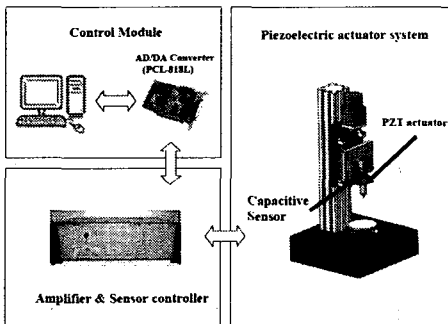


Fig. 6 Control system structure of piezoelectric tester

4.2 실험데이터를 이용한 역히스테리시스 모델링

식(3)과 식(4)를 이용하여 압전구동기의 역 히스테리시스 특징을 모델링 하기 위해서는 먼저 바깥 쪽 메이저 루프(major loop)의 모델식을 구해야 한다. Fig. 7 은 압전구동기에 0V 에서 500V 까지 전압을 증가한 다음 0V 로 전압을 감소시켜 전압과 변위의 관계를 실험적으로 구한 뒤, 발생하는 메이저 루프에 대한 전압-변위 데이터를 3 차 다항식으로 보간한 식을 보여주고 있다.

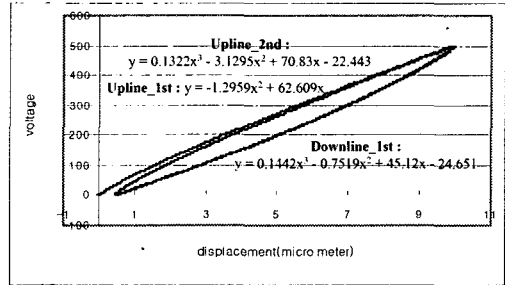


Fig. 7 Curve fitting equation of major loop derived from experiments

4.3 역히스테리시스 모델과 PID 및 신경 회로망 제어기를 이용한 사인 곡선 추종 실험

압전구동기를 초기 4.5μm 에서 상하 ±3μm 의 진폭으로 샘플링 타임을 2ms 로 설정한 후 4 가지의 제어 입력으로 각각을 비교 하였다. Fig. 8 과 Fig. 9 는 역 히스테리시스 모델을 이용한 구동 실험으로써 ±0.5μm 의 오차를 가지고 구동하였다.

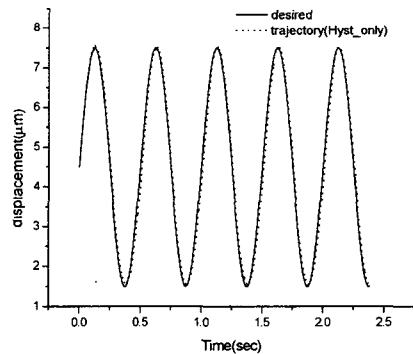


Fig. 8 Tracking result of the piezoelectric actuator with Inverse hysteresis model

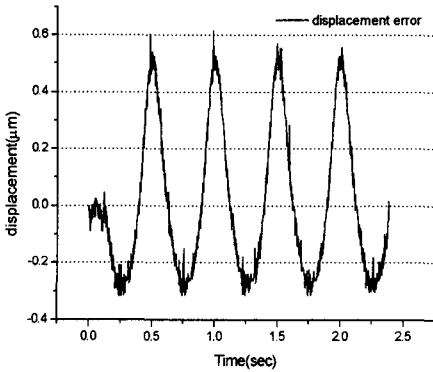


Fig. 9 Tracking error of the piezoelectric actuator with Inverse Hysteresis model

Fig. 10 와 Fig. 11 는 단순한 PID 제어기만을 이용한 실험으로 평균적으로 $\pm 150nm$ 의 오차를 가지고 궤적을 추종하는 것을 알 수 있다.

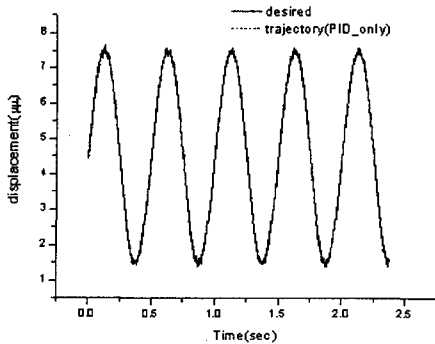


Fig. 10 Tracking result of the piezoelectric actuator with PID control

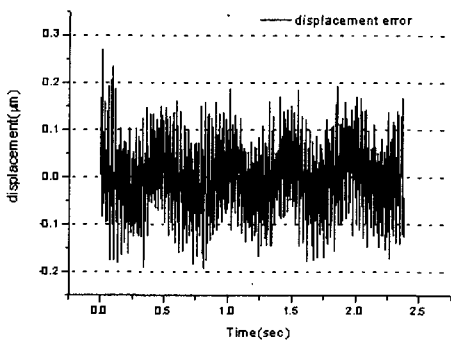


Fig. 11 Tracking error of the piezoelectric actuator with PID control

Fig. 12 와 Fig. 13 는 각각 역 히스테리시스 모델과 PID 제어기를 병렬로 결합시킨 제어기를 이용한 실험 결과를 보여준다. 오차 변화의 폭이 단순한 PID 제어기를 사용한 경우보다 줄었으며 $\pm 80nm$ 의 오차로 구동하였다.

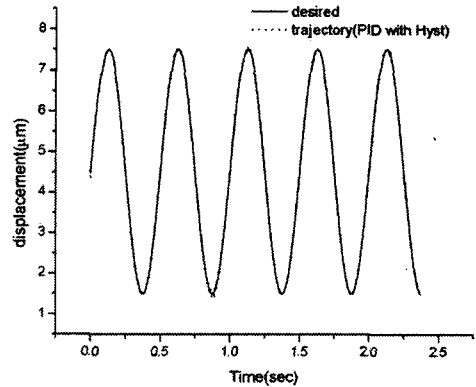


Fig. 12 Tracking result of the piezoelectric actuator with Inverse Hysteresis model and PID control

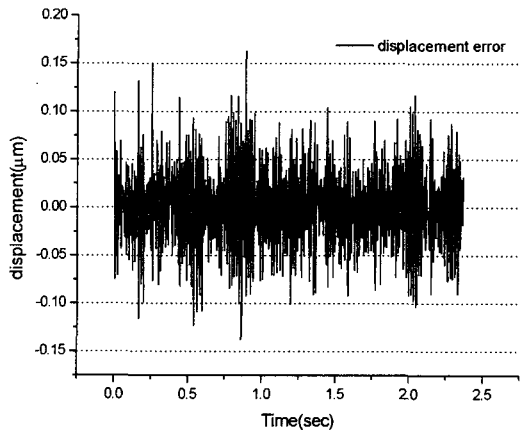


Fig. 13 Tracking error of the piezoelectric actuator with inverse hysteresis model and PID control

Fig. 14 과 Fig. 15 은 역 히스테리시스 모델과 PID 제어기 및 신경회로망을 이용한 실험 결과이며 $\pm 60nm$ 정도의 오차로 구동하였다.

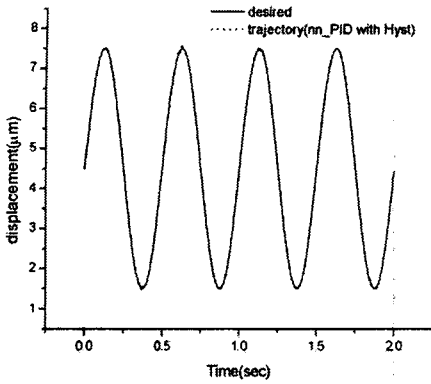


Fig. 14 Tracking result of the piezoelectric actuator with inverse hysteresis model, neural network and PID control

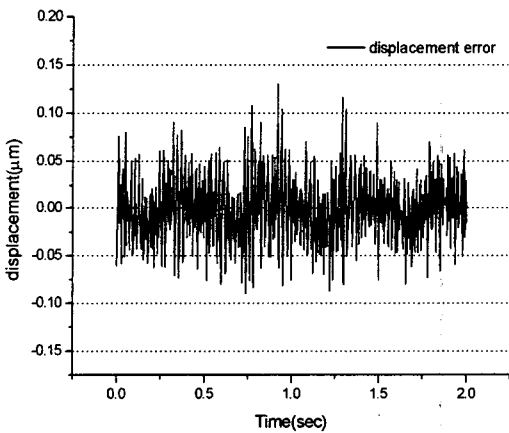


Fig. 15 Tracking error of the piezoelectric actuator with Inverse hysteresis model, neural network and PID control

단순한 PID 제어기만을 이용한 구동 실험에서는 케적이 상승할 때와 하강할 때 오차의 폭이 변하였지만 역 히스테리시스 모델과 PID 제어기를 병렬로 이용한 제어기에서는 이러한 오차의 변화폭이 사라졌다. 또한 역히스테리시스 모델에서 출력되는 앞먹임 제어 입력으로 인해 PID 제어기만을 사용한 실험에서 구동 초기에 나타나던 Over shoot 현상도 제거되었다. 최종적으로 역히스테리시스 모델, 신경회로망 그리고 PID 제어기를 병렬로 사용했을 경우

전체적인 오차의 폭이 더욱 줄어든 것을 확인할 수 있었다.

5. 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 보상을 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.

후 기

본 연구는 울산대학교 2003 년도 교비지원으로 수행되었으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Jung, S. and Kim, S., "Improvement of scanning accuracy of PZT piezoelectric actuators by feedforward model-reference control," Precision Engineering. Vol.16, No.1, pp.49-55, 1994.
2. Newcomb, C. V. and Flinn, I., "Improving the Linearity of Piezoelectric Ceramic Actuators," Electronics Letters, Vol.18, No.11, May, pp.442-444. 1982.
3. Kaizuka, H. and Sui, B., "A simple way to reduce hysteresis and creep when using piezoelectric actuators," Japan J. Appl. Phys, Vol.27, No.5, pp.773-776, 1988.
4. Tanaka, M., Jiang, Z. W. and Chonan, S., "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.
5. Ge, P. and Jouaneh, M., "Tracking Control of a Piezoceramic Actuator," IEEE transactions on control systems technology, Vol. 4, No. 3, 1996.
 6. Kim, H. S., Lee, B. R. and Park, K. Y., "Precision Position Control of a Piezoelectric Actuator Using Neural Network," J. of the KSPE, Vol. 16, No. 11, pp. 9-15, 1999.
 7. Hong, S. R., "Precision Position Control of a Piezoelectric Actuator Using Hysteresis Compensation," Univ.of Ulsan, 2000.