

역 히스테리시스 모델을 이용한 압전 구동기의 정밀위치 제어

김정용(울산대 기계공학 대학원)*, 이병룡(울산대 기계공학)**,
양순용(울산대 기계공학)**, 안경관(울산대 기계공학)**

Precision Position Control of Piezoactuator Using Inverse Hysteresis Model

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, 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 : Key Words : piezoelectric, ferroelectric, hysteresis, nonlinearity, feedforward, hysteresis model, inverse modeling, feedback

1. 서론

최근 반도체 제조장치, 초정밀 동작기계, 정보기기 등의 분야에서 고정도화, 고정밀화 등으로 인해 정밀한 위치 결정기술을 요구하고 있다. 이처럼 위치결정 기술은 산업 전반에 포괄적으로 응용되는 기술로 현재는 서브마이크론 영역의 위치정밀도를 요구하고 있으며 21세기 초에는 정밀도가 정밀 가공 분야에서는 10nm, 초 정밀가공 분야에서는 1nm의 정도까지 도달할 것으로 예상되어지고 있다. 그러나 기존의 DC 모터, 유압 액츄에이터, 전기기계적 액츄에이터로는 나노급의 위치결정 분해능을 얻기 어렵고 충분한 응답속도나 소형화가 힘들다. 따라서 최근에는 형상기억합금, 정전액츄에이터, 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. 압전구동기는 고응답성과 고강성 특성을 가지며 구동력과 전압의 제어에 의한 높은 분해능을 얻을 수 있으며 구동력이 크며 주파수 응답 특성이 양호하다는 장점을 가지고 있다. 하지만 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. 이러한 히스테리시스의 비선형에 의한 정밀도 저하를 방지하는 기술로는 이력현상을 모형화하는 기법[5], 폐회로 기법[3], PZT를 전하로 제어하는 기법[1], Preisach model를 이용하여 압전구동기의 히스테리시스를 모델링하는 방법[4] 여러가지 패턴의 히스테리시스를 추출하여 학습을 통하여 보상하여 주는 방법 등이 있으며[6][7]

본 논문에서는 선형적으로 구동기를 제어하기

위해 히스테리시스를 전압과 변위사이의 관계를 수학적으로 하였다. 히스테리시스의 모델을 역으로 계산하여 원하는 변위에 대해서 전압이 나오도록 역 스테리시스 모델을 만들었다. 역 히스테리시스 모델은 히스테리를 줄이는 앞 먹임 제어에 이용하였다. 하나의 역 모델을 이용하여 압전구동기의 여러가지 패턴의 움직임을 예측하고 적절한 제어 신호를 출력하게 하였다. 또한 PID 뒤 먹임 제어를 이용하여 역 히스테리시스 모델에서 생기는 오차를 보상하게 하였다.

2. 압전구동기의 히스테리시스 모델링

히스테리시스를 모델링 하기 위해서 먼저입력 전압과 변위에 대한 관계를 실험을 통해서 알아 보았다.

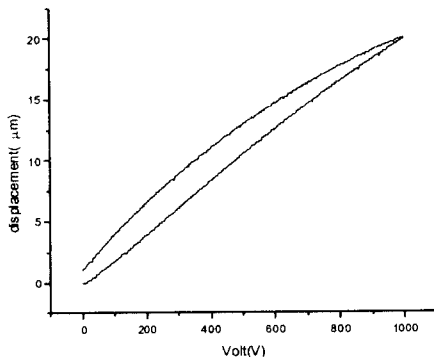


그림 1 압전구동기의 히스테리시스 응답

그림 1 은 0V 에서 1000V 까지 1000V 에서 0V 까지 인가전압을 서서히 조정해 가며 변위를 측정하였다. 압전 구동기의 변위가 스트로크 한번으로 이루어 진다면 그림 1 과 같은 형태로 변위가 나타나게 될 것이다. 하지만 압전 구동기의 스트로크를 다르게 하여 반복적으로 움직이게 한다면 그림 2 와 같은 복잡한 형태의 변위 형태가 나타나게 될 것이다. 그림 2 에서 바깥쪽 가장 큰 루프를 major loop, 안쪽의 다른 루프를 minor loop 라고 한다. major loop 와

minor-loop 상승곡선과 하강 곡선은 비슷한 개형으로 루어져 있다.

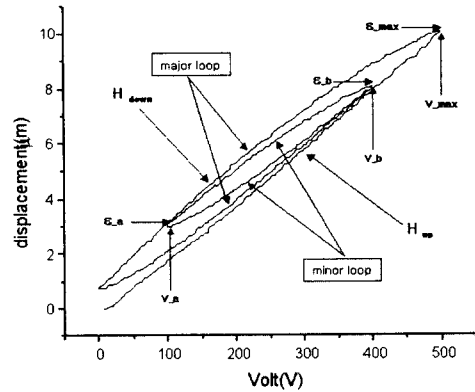


그림 2 반복 입력에 대한 히스테리시스의 응답

위의 (1),(2)식은 전압을 입력으로 구한 식이 된다. 원하는 목표 값을 추종하기 위해서는식(1) (2)의 역값, 역 히스테리시스 값을 구해야 한다. 상승시와 하강시에 역히스테리시스 모델은 다음과 같다.

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

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

위 식에 사용한 변수는 다음과 같다.

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

3. 실험

3.1 장치 구성

실험에서 사용된 장치는 아래의 그림 4 와 같이 구성하였다..

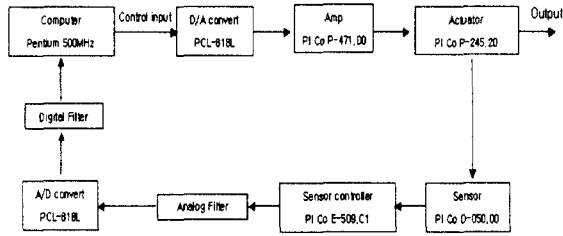


그림 3. 시스템 장치구성 및 사양

실험에 사용한 압전구동기의 최대 스트로크는 $20\mu\text{m}$ 이고 센서는 커패시티 센서를 사용하였으며 $25\mu\text{m}\sim 75\mu\text{m}$ 안에서 측정이 가능하며, Amp 는 1000V 까지의 출력을 낸다. 또한 필터를 사용하여 신호의 노이즈를 줄이도록 하였다

3.2 실험 결과

3.2.1 역 히스테리시스 모델 결과치

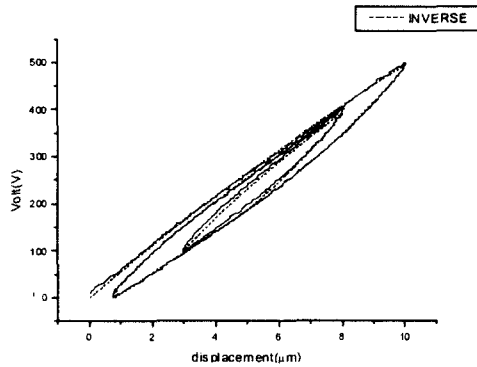


그림 4 실험값과 히스테리시스 모델링에 의한값

위의 그림 4 는 역 히스테리시스 모델을 이용한 것과 그림 2 의 실험치를 비교한 것이다. 위의 그림에서 역 히스테리시스 모델은 목표 값이 입력으로 들어가면 그에 해당하는 전압을 잘 내어 주는 것을 잘 볼수 있다. 특히나 major-loop 는 수시적으로 보간한 식을 바로 사용하여 정확하지만 minor loop 는 major loop 의 식을 평행 이동 시켜 만든 모델이었지만 실제 실험치와 흡사하게 나왔다.

3.2.2 역 히스테리시스 모델을 이용한 구동실험

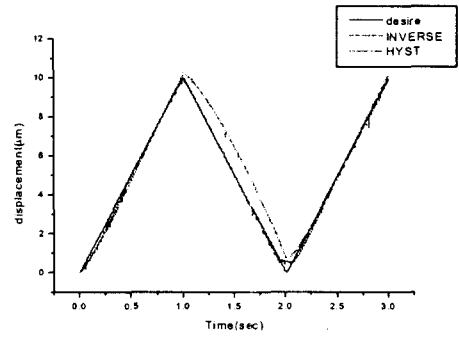


그림 5 역 히스테리시스를 사용한 단일 스트로크

식 (3)(4)에서 보여준 모델링의 수식을 실제 시스템에 적용시켜 실험 하였다. 역 히스테리시스 모델을 사용하지 않은 시스템은 압전 구동기에 선형적으로 전압을 인가하였다. 위의 그림 5 는 역 히스테리시스 모델을 사용한 실험결과와 직선적으로 전압을 인가한 시스템의 결과를 비교한 것이다.

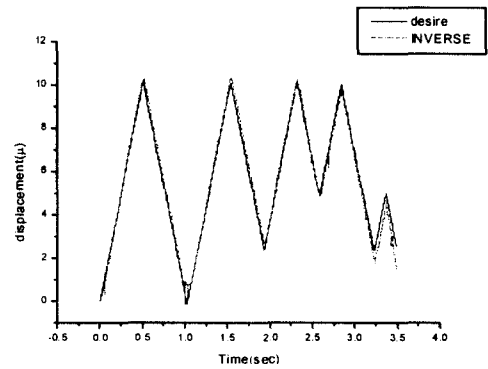


그림 6 역 히스테리시스를 사용한 반복 반복스트로크

그림 6 은 반복하여 다른 스트로크를 주었을 때 역 히스테리시스 모델을 사용한 압전구동기의 실험 결과 이다. 스트로크의 길이가 다른 반복 실험에서도 압전구동기는 선형적인 구동을 하였다.

3.2.3 PID 제어기실험

압전구동기를 PID 제어방식을 통해서 실험을 하였다.

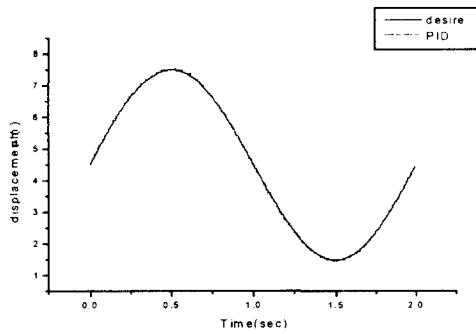


그림 7 PID 제어기의 사인 추종곡선

사인 곡선을 추종하도록 하였으며 실험을 통해서 PID 계인을 조정 하였다. 초기값이 4.5 이고 ± 3.5 의 진폭과 2 초에 한 주기를 가진 사인 곡선을 추종하도록 실험 하였다 .그림 7 은 PID 제어기를 이용한 사인 추종 그래프이다.

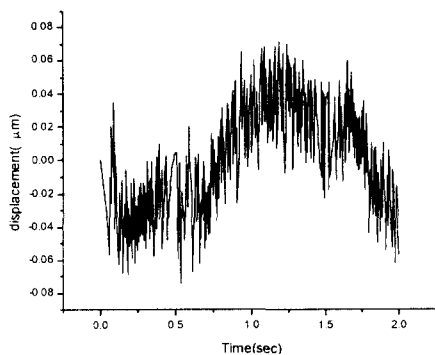


그림 8. PID 오차그래프

그림 8 은 사인추종 오차 그래프이다. 오차가 60nm 에서+60nm 까지 나왔다.

4. 결과

히스테리시스를 모델링하고, 역 히스테리시스 모델을 설정하였다. 압전구동기의 비선형적 요소인 히스테리시스를 역 히스테리시스 모델을 이용하여 선형적으로 구동하도록 하였으며, 크기가 다른 반복적인 스트로크에도 압전구동기가 선형적으로

구동을 하였다. 또한 사인 곡선 추종 하계한 PID 제어기의 성능이 60nm 에서+60nm 까지 나오게 되었다.

후기

본연구는 과학재단 지원 울산대학교 지역협력센터(RRC) 지원으로 수행되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- [1]C. V. Newcomb and I. Flinn, " Improving the Linearty of Piezoelectrictrid Ceramic Actuator" , Electronics Letters. Vol.18, No.11, may pp442~444 1982
- [2] Donald Croft and Santosh Devasia, " Hysteresis and Vibration Compensation for Piezoactuator" Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol.21, No5, pp710~717, 1998
- [3]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, pp773~776,1988
- [4]Ping Ge and Musa Jouaneh. " Modiong hysteresis in piezoceramic actuators" Pecision Eng. Vol.17 pp211~221
- [5] S. Jung and S. Kim. " Impovement of scanning accuracy of PZT piexoelectric by feedforward model-reference control" , Pecision Eng. P. Ge and M. Jouaneh, Vol 16, No1,pp,49~55,1994
- [6]정세웅, " 학습제어를 이용한 압전 구동기 시스템의 초정밀 위치제어" , 울산대학교 1999 년
- [7]홍성룡 " 히스테리시스를 보상을 이용한 압전구동기의 정밀 위치제어" 울산대학교 2000 년
- [8] 김승한, 송하성, 송재욱, 김의중, " 압전 재료를 이용한 초 정밀가공기용 공구 위치 제어" 한국 정밀 공학회, 96 년도 추계학술대회논문집, pp162~166