

압전 구동기의 히스테리시스를 고려한 건설제어

양 창 관, 곽 재 혁, 임 준 홍  
한양대학교 전자컴퓨터 공학부

Robust Control of Hysteresis for Piezo Actuator

Changkwon Yang, Jaehyuk Kwak, Joonhong Lim  
School of Electrical Engineering and Computer Science, Hanyang University

**Abstract** - 압전 구동기는 전기적 에너지를 직접 동역학적 에너지로 변환하는 세라믹 구동기이다. 특히 압전 구동기의 개방 회로 시스템은 분자 구조 특성에 의해 비선형적인 히스테리시스 특성과 크리프 특성을 가진다. 이러한 비선형적 시스템을 작은 분해능으로 제어하는 경우 이에 따른 외란, 모델링의 불확실성 등의 오차가 발생하게 된다. 따라서, 현재 이러한 비선형적 오차를 기존의 PID 및 최적제어를 사용하여 보상하는 방법에 대해서 많은 연구가 진행되고 있다. 본 논문에서는 압전 구동기 위치 결정 시스템 전체에 대해 LQG 제어 및  $H_{\infty}$  제어를 적용하여 시뮬레이션을 실시하였다. 또한 본 논문은 시뮬레이션 결과를 바탕으로 실제 압전 구동기 위치 결정 시스템에  $H_{\infty}$  제어를 적용하여 제안된  $H_{\infty}$  제어가 시스템 성능에 영향을 주는 외란, 모델링의 불확실성 등을 효과적으로 제거함을 보여준다.

1. 서 론

나노 위치 제어(nano-positioning control)는 nano imprinting, scanning microscopy, microlithography 등 여러 분야의 주요 기술을 가능하게 하는 핵심기술 중 하나이다 [1]. 산업체 또는 정부에 의해 나노 기술과 바이오 기술에 대한 투자가 시작된 이후, 압전 구동기의 작동 기술에 대한 관심이 지속적으로 증대되고 있다. 압전소자 - Piezo electrics(PZT)는 전기적 에너지를 직접 움직임(mechanical energy)으로 변환시키는 세라믹 구동기이다. 이때의 움직임은 나노 단위의 분해능이 가능할 뿐만 아니라 매우 안정적이며 또한 충분히 빠른 가속성능을 보인다 [2-5].

고전압 압전소자 - high voltage PZT(HVPZT)와 모노리틱 압전소자 - low voltage monolithic multi-layer PZT(LVPZT)등 두 가지 형태의 압전소자가 현재 가장 널리 사용된다. 모노리틱 압전소자는 고전압 압전소자에 비해 크기가 작고 구동 전압이 낮아서 집적이 용이하나 가용 온도가 낮은 단점이 있다[6].

본 논문에서는 고밀도 집적에 용이한 모노리틱 압전소자를 대상으로 전체 위치 결정 시스템 성능에 영향을 주는 압전 구동기의 비선형적 히스테리시스 특성을  $H_{\infty}$  제어를 통해 억제한다. 특히  $H_{\infty}$  제어의 성능은 시뮬레이션을 통해 LQG 제어와 비교되며 이에 따른 결과는 실제 위치 결정 시스템에 효율적인 제어기로서 적용된다.

2. 압전 구동기

2.1 압전 구동기의 힘 모델

일반적으로 나노 단위의 분해능으로 원하는 위치 값을 정확하게 얻어내는데 압전 구동기는 적용되었다. 이 때 만약 강제적 위치 제한이 존재한다면 압전 구동기는 blocked force라는 힘을 발생시킨다. 또한 이때의 blocked force는 압전 구동기의 위치 값 감소에 직접적으로 관련된다. 압전 구동기의 최대 blocked force -  $F_{max}$ 는 다음과 같이 압전소자의 강인성(stiffness)과 최

대 위치 변화 값에 의존한다.

$$F_{max} \approx K_p \Delta L \tag{1}$$

$\Delta L$ 이 압전소자 위치에 대한 변화 값일 때,  $K_p$ 는 강제적 위치 제한을 받지 않을 때의 압전소자 강인성을 나타낸다. 그림 1은 인가전압에 따른 압전소자 위치 값의 변화를 나타낸다.

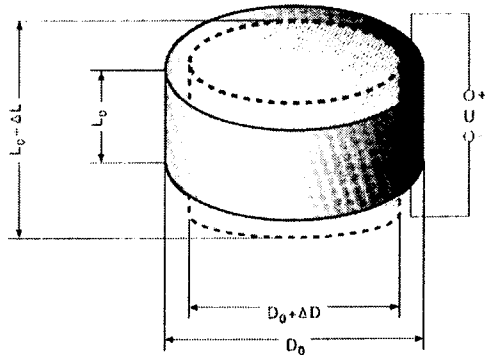


그림 1. 인가전압에 따른 압전소자의 위치 변화

인가전압  $v(t)$ 와 압전소자 위치 값 사이의 관계는 일반적으로 서로 비례하지 않을 뿐만 아니라 비선형 히스테리시스 형태를 띠게 된다. 그리고 압전 구동기의 히스테리시스 특성은 그림 2와 같이 나타낼 수 있다.

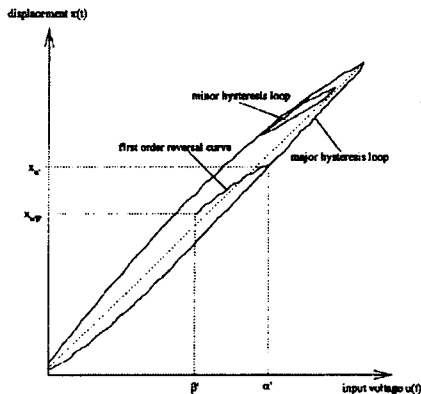


그림 2. 압전 구동기의 인가전압에 따른 히스테릭 응답

$$\Delta L(t) = P(v(t)) \tag{2}$$

$P(\cdot)$ 가 비선형적 히스테리시스 특성 함수를 나타낼 때,

$v(t)$ 는 인가전압이며,  $\Delta L(t)$ 는 압전 구동기 변위의 증감을 나타낸다.

제어기 디자인에서는 기존의 백래쉬(backlash) 비선형 모델 대신 히스테리시스를 나타내기 위한 시연속 역학 모델이 다음과 같이 제안 되었다.

$$\frac{dL(t)}{dt} = \alpha \left| \frac{dv(t)}{dt} \right| (pv(t) - L(t)) + B \frac{dv(t)}{dt} \quad (3)$$

$L(t)$ 와  $v(t)$ 가 각각 압전 구동기의 출력과 입력을 의미하며  $\alpha$ ,  $p$ ,  $B$ 는 각각 상수 값을 나타낸다. [7]의 증명에서, 식 (3)의 각 항들은 다음과 같이  $v(t)$ 에 대해 간결한 형태로 나타낼 수 있다.

$$L(t) = pv(t) + g(v(t)) \quad (4)$$

### 2.2 히스테리시스를 고려한 제어기 설계

그림 3은 반복 제어 구조의 블록 다이어그램을 보여준다.

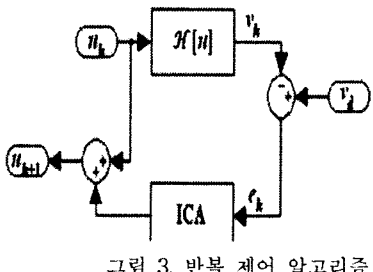


그림 3. 반복 제어 알고리즘 구조

일반적으로, 비선형 히스테리시스 시스템은 다음과 같이 나타낸다.

$$v(t) = H[u](t) \quad (5)$$

$u(t)$ 가 입력을 의미할 때  $v(t)$ 는 출력이며  $H$ 는 히스테리시스 오퍼레이터이다. 유한한 시간구역  $I = [t_0, T]$  내에서 정의되면서 주어진 목표 궤적  $v_d(t)$ 에 대하여, 다음과 같은 반복 제어 알고리즘 - iterative control algorithm(ICA)으로 목표 값인 입력  $u_d(\cdot)$ 를 찾는다 [8].

$$\begin{aligned} u_{k+1}(t) &= u_k(t) + \rho[v_d(t) - v_k(t)], \\ &= u_k(t) + \rho e_k(t) \end{aligned} \quad (6)$$

$[t \in I]$ 인 모든  $t$ 에 대해  $v_d(t) = H[u_d](t)$ 이다. 식 (6)에서  $\rho$ 는 상수이며  $v_k(t)$ 와  $u_k(t)$ 는 각각  $k$ 번째 오퍼레이팅 시도에 대한 출력과 입력이다.

## 3. 시뮬레이션 및 실험 결과

### 3.1 시뮬레이션

그림 4는 압전 구동기 위치 결정에 대한 히스테리시스 특성을 제어하는 폐회로 시스템 구조 및 이것의 선형 분할 변환 - linear fractional transform(LFT) 형태를 나타낸다. 압전 구동기 위치 값  $v_2$ 는 불확실성(uncertainty)  $\delta_2$ 를 가지며, 이 값을 밖으로 끄집어내면 그림 4b와 같이 제어 시스템에 대한 LFT 형태로 나타낼 수 있다 [10].

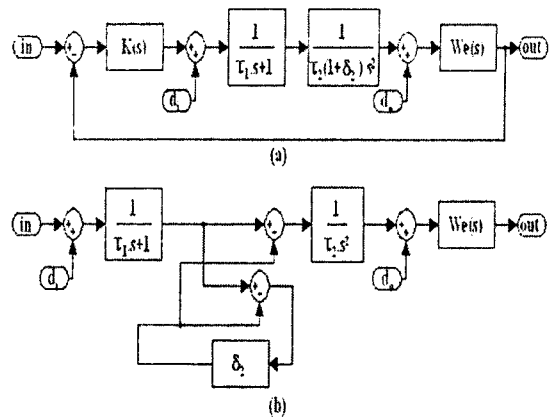


그림 4.  $H_\infty$  제어에 대한 시뮬레이션 구조 및 LFT

그림 4b와 같은 시스템에 대한 시뮬레이션에서 초기 조건은  $\tau(0) = 0[\text{sec}]$ 으로 주어지며 reference 궤적은 다음과 같이 주어진다.

$$\tau(t) = [40 \mu\text{m}] \quad (7)$$

이 때, 외란  $-d_1$ ,  $d_2$ 와 불확실성  $-\delta_2$ 를 동시에 가지는 폐루프 시스템에 대한  $H_\infty$  제어가 압전 구동기 위치 값 보상에 적용된다. 그림 5는 제안된  $H_\infty$  제어가 LQG 제어에 비해 더 작은 overshoot을 달성할 수 있음을 보여준다. 특히 그림 5b는 시스템 파라미터인  $\delta_2$ 의 값이 0.8 이상인 경우에 대하여 LQG 제어가 외란과 모델링 불확실성에 의한 영향을 정확하게 따라가지 못함을 보여 주며 그림 5d는  $H_\infty$  제어가 LQG의 경우에서 제거하지 못했던 외란 및 불확실성을 효과적으로 억제할 수 있음을 확증한다.

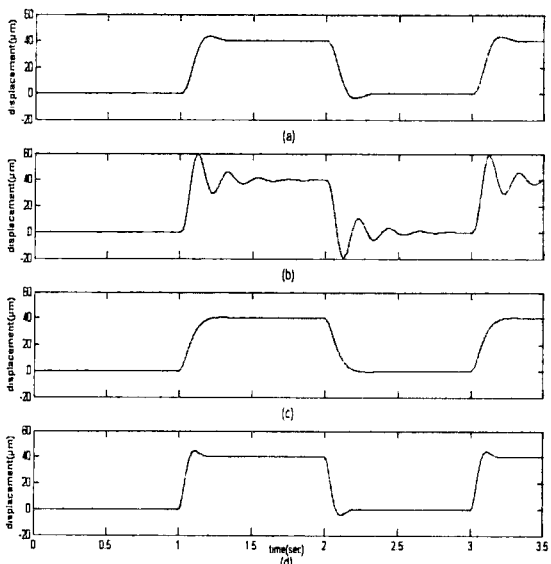


그림 5. 압전 구동기 위치 값 제어 시뮬레이션 결과  
 (a). LQG 제어,  $\delta_2 = 0.5$   
 (b). LQG 제어,  $\delta_2 = 0.8$   
 (c).  $H_\infty$  제어,  $\delta_2 = 0.5$   
 (d).  $H_\infty$  제어,  $\delta_2 = 0.8$

### 3.2 실험

그림 6은 실험을 위한 시스템 구성도를 나타내고 있으며 표 1은 실험에 사용된 장비를 설명한 것이다.

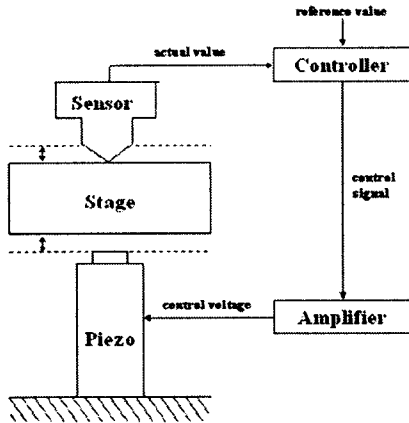


그림 6. 압전 구동기의 폐회로 위치 값 제어 시스템 구조

표 1. 제어장치 구성 사양

	모델명	제원
압전소자	PI, P842.30	변위 45 $\mu$ m 분해능 0.45 $\mu$ m
증폭기	PI, E501.00	전압증폭 100V
DAQ카드	NI, E6062E	DAC 12bit
출력모듈	NI, SCB-68	핀 구성 68Pin 출력포트 2out
변위센서	PI, D-100.00	측정한계 300 $\mu$ m

압전소자는 PI사의 P842.30이 사용되었고 센서로는 PI사의 D-100.00 커패시턴스 센서가 사용되었다. 센서에 의해 측정된 변위는 디지털 값으로 PC의 RS232 포트를 통해 입력된다. 또한 PC에서 Labview로 구현된 제어가 제어신호를 연산 및 생성한 후에 데이터 수집 - data acquisition(DAQ) 카드를 통해 압전 구동기 입력 전압을 증폭기로 전달한다. 압전 구동기 변위에 대한 reference 값은 40 $\mu$ m로 설정하였다.

그림 7은 압전 구동기 위치에 대한 폐회로 제어 시스템의 결과를 나타낸다. 제안된 H $\infty$  제어기는 시뮬레이션의 결과와 마찬가지로 각 파라미터에 대해 시스템의 외란 및 불확실성을 제거했으며 제어대상인 압전 구동기의 히스테리시스 특성을 효과적으로 억제하였다.

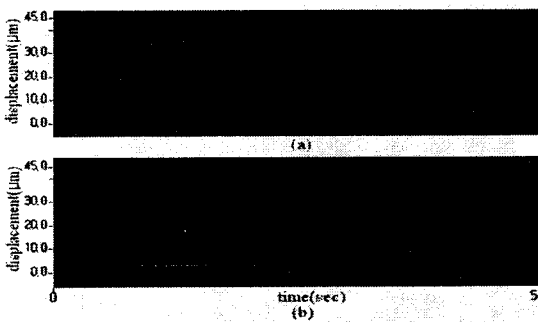


그림 7.  $\delta_2$ 가 각각 0.5, 0.8일 때의 H $\infty$  제어기에 의한 압전 구동기 위치 값 제어 결과

### 4. 결 론

본 논문에서는 시스템 성능에 영향을 주는 압전 구동기의 비선형적인 히스테리시스 특성을 H $\infty$  제어를 통해 제거하였고 이 결과를 시뮬레이션을 통해 LQG 제어와 비교하였다. 또한 시뮬레이션 결과를 근거로 제안된 H $\infty$  제어가 외란 및 모델링 불확실성 억제라는 측면에서 LQG 제어기보다 더 우수한 결과를 낳게 됨을 보여주었다.

특히, 위 시뮬레이션 내용을 바탕으로 실제 압전 구동기 위치 결정 시스템에 H $\infty$  제어를 적용한 결과, 제안된 H $\infty$  제어는 우리가 목표로 하는 압전 구동기의 위치 결정 성능(positioning performance)을 충분히 만족시켰다. 따라서 압전 구동기의 위치 결정에 있어서 H $\infty$  제어를 시스템에 효과적으로 적용할 수 있음이 본 논문을 통해 입증되었다.

향후, 본 논문의 내용을 바탕으로 nano imprinting, scanning microscopy, micro-lithography 기술 등 여러 응용 분야에 걸쳐 압전 구동기 시스템의 성능 향상이 예상되며 압전 구동기 위치 결정에 있어서 보다 나은 신뢰도와 더욱 뛰어난 제어 효율을 보장하는 제어기가 지속적으로 연구될 것이다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Spanner, K.; Vorndran, S.; "Advances in piezo-nanopositioning technology", Advanced Intelligent Mechatronics, 2003. AIM 2003. Proceedings. 2003 IEEE/ASME International Conference on, vol. 2, pp. 1338-1343, 2003
- [2] Stilson, S.; McClellan, A.; Devasia, S.; "High speed solution switching using piezo-based micropositioning stages", Biomedical Engineering, IEEE Transactions on, vol. 48, no. 7, pp. 806-814, 2001
- [3] Croft, D.; Shedd, G.; Devasia, S.; "Creep, hysteresis, and vibration compensation for piezoactuators: atomic force microscopy application", American Control Conference, 2000. Proceedings of the 2000, vol. 3, pp. 2123-2128, 2000
- [4] Cloosterman, M.; Goossens, H.; Steinbuch, M.; Schneiders, M.; "Compensation of mode shapes with a piezo electric actuator for an optical drive", American Control Conference, 2003. Proceedings of the 2003, vol. 1, pp. 725-730, 2003
- [5] Handley, D.C.; Wei Zhao; Zhang, W.J.; Li, Q.; Tien-Fu Lu; "An experimental observation of uncoupling of multi-DOF PZT actuators in a compliant mechanism", Control, Automation, Robotics and Vision, ICARCV 7th International Conference on, vol. 3, pp. 1354-1358, 2002
- [6] Pechrach, K.; McBride, J.W.; Weaver, P.M.; "Arc root mobility on piezo-actuated contacts in miniature circuit breakers", Electrical Contacts, 2003. Proceedings of the Forty Ninth IEEE Holm Conference on, pp. 76-83, 2003
- [7] Jian Wang; Chun-Yi Su; Stepanenko, Y.; "Two DOF modeling with three-dimensional forces and robust chatter control in metal cutting by piezo-actuator", Advanced Intelligent Mechatronics, 2003. AIM 2003. Proceedings. 2003 IEEE/ASME International Conference on, vol. 2, pp. 844-849, 2003
- [8] Jian Wang; Chun-Yi Su; Oya, M.; "Theoretic modeling and adaptive control for two degree of freedom piezo electric actuated chatter suppression system", Decision and Control, 2003. Proceedings. 42nd IEEE Conference on, vol. 4, pp. 4315-4320, 2003
- [9] Leang, K.K.; Devasia, S.; "Iterative feedforward compensation of hysteresis in piezo positioners", Decision and Control, 2003. Proceedings. 42nd IEEE Conference on, vol. 3, pp. 2626-2631, 2003
- [10] Jeffrey B. Burl, "Linear Optimal Control", Addison Wesley, P138-140, 1998

- [11] Somov, Y.I.: "Modelling physical hysteresis and control of a fine piezo drive", Physics and Control, 2003. Proceedings. 2003 International Conference, vol. 4, pp. 1189-1194, 2003
- [12] Ronkanen, P.; Kallio, P.; Koivo, H.N.: "Current control of piezoelectric actuators with power loss compensation", Intelligent Robots and System, IEEE/RSJ International Conference on, vol.2, pp. 1948-1953, 2002
- [13] Sebastian, A.; Salapaka, S.: "H<sub>∞</sub> loop shaping design for nano-positioning", American Control Conference, 2003. Proceedings of the 2003, vol. 5, pp. 3708-3713, 2003
- [14] Liao, W.H.; Law, W.W.; Chan, K.W.: "Implementation of adaptive structures with enhanced self sensing piezoelectric actuators", Industrial Technology, 2002. IEEE ICIT '02. IEEE International Conference on, vol. 2, pp. 955-960, 2002
- [15] Pourboghra, F.; Pongparoj, H.; Aazhang, B.: "Vibration Control Of Flexible Beams Using Self Sensing Actuators", World Automation Congress, Proceedings of 5th Biannual, vol.14, pp. 133-139, 2002
- [16] Boucher, E.; Sebald, G.; Guyomar, D.; Pleska, E.: "Piezoceramic coefficient hysteresis under high stress and electric field", Applications of Ferroelectrics, 2002. ISAF 2002. Proceedings of the 13th IEEE International Symposium on, pp. 49-52, 2002
- [17] Krejci, P.; Kuhnén, K.: "Inverse control of systems with hysteresis and creep", Control Theory and Applications, IEE Proceedings, vol. 148, no. 3, pp. 185-192, 2001