

외란 관측기와 적분제어를 이용한 강인 제어기 설계 및 분석

Robust Controller Design and Analysis Using Disturbance Observer and Integral Control

박 홍 섭*, 이 충 우**, 정 정 주***

(Hong Seob Park, Chung Woo Lee, Chung Choo Chung)

Abstract - 압전 구동기(Piezo actuator)는 수 나노미터 수준의 위치정밀도와 고분해능을 가지고 있으나 비선형 특성인 히스테리시스(Hysteresis)는 정상상태에서 위치 오차를 발생하는 주요 원인이 된다. 현재까지 히스테리시스를 보상하기 위해 피드 포워드 제어 방법, PI 제어 방법, H_{∞} 제어 방법 등이 연구되어 왔지만 저주파 대역의 외란(disturbance)까지 고려하여 시스템을 주파수 영역에서 설계, 분석하는 방법에 대한 연구는 미흡하였다. 본 논문은 압전 구동기의 위치 제어를 위한 제어기의 설계와 이를 주파수 영역에서 분석하는 내용을 다룬다. 제어기의 설계는 히스테리시스를 보상하기 위해 극점 배치 방법과 외란 관측기(Disturbance observer)를 기본으로 하였으며 적분제어를 적용하여 시스템 민감도(sensitivity)를 개선하였다. 시뮬레이션과 실험을 통하여 설계한 제어기가 히스테리시스에 대한 보상과 민감도의 개선에 효율적임을 검증하였다.

Key Words : Piezo actuator, Nano stage, Disturbance observer, Integral control, sensitivity, hysteresis

1. 서론

나노 과학기술에 대한 관심이 높아지면서 나노 조작용을 위한 초정밀 구동장치의 중요성이 높아지고 있다. 압전 구동기는 수 나노미터 수준의 위치 정밀도와 분해능을 갖는 구동기로서 반도체, 고집적 저장매체 및 초정밀 주사현미경 등 많은 분야에서 사용되고 있다. 이러한 압전 구동기의 정확한 위치 제어를 위해서는 압전 소자가 가지고 있는 비선형적 특성인 히스테리시스의 해결이 중요하다. 히스테리시스는 정상상태에서 오차를 발생시키는 주요원인으로 정확한 위치제어를 어렵게 한다.

최근 압전 소자의 비선형적 특성인 히스테리시스의 비선형성을 모델링 하거나 보상하기 위해 다양한 연구가 이루어져 왔다. Furutani는 압전 소자를 전하로 구동함으로써 히스테리시스의 영향이 적게 나타나는 결과를 확인하였다. 이를 바탕으로, 구동은 전압으로 인가하고 압전 소자에 축적되는 전하량을 피드백 받는 제어방법을 제안하였다[1]. Krejci와 Kuhnen은 히스테리시스와 Creep에 대한 근사 수식을 이용하여 역 보상을 구동기 전단에 달아 선형 구동기를 설계하는 방법을 제안하였다[2]. 이 외에도 Preisach 모델 식으로 히스테리시스를 모델링하고 이를 이용한 피드포워드 제어방법이 제안되었으며[3], Maxwell slip 모델을 이용한 피드백 선형루프를 구성한 제어방법도 제안되었다[4]. 또한 Chang과 Sun은 구동기 추종에 PI 제어를 이용하고, 기계적인 공진 성분을 입력 선형화 기법으로 상쇄시키는 제어 방법을 제안하였다[5].

그리고 Salapaka와 Sebastian에 의하여 선형 PI 제어구조에 H_{∞} 방식을 이용하여 동작속도를 개선하는 방법도 제안되었다[6]. 이후 ramp파의 오차 없는 추종을 위하여 기존의 PI 제어기에 적분기를 하나 더 사용한 PII 제어구조에 H_{∞} 방식을 적용한 디자인 기법을 제안하였다[7]. 현재 상용 제품에는 선형 PI 제어를 이용하여 압전 소자의 비선형에 의한 오차를 없애는 방법이 쓰이고 있다.

이러한 연구들은 압전 구동기의 빠른 구동에 초점을 두고 시간 영역에서 히스테리시스를 보상해 왔다. 그러나 히스테리시스는 저주파에서 두드러지게 나타나는 경향이 있다. 따라서 저주파에서 히스테리시스의 영향력을 줄이기 위해 제어가 저주파 영역에서 강인하게 동작하도록 설계할 필요가 있다. 따라서 본 논문은 히스테리시스 특성을 보상하면서 주파수 영역에서 민감도에 대해 설계, 분석하였다. 여기서 사용한 제어기는 극점 배치 방법을 기반으로 add-on 방식의 상태 공간 외란 관측기와 적분 제어기를 적용하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성되었다. 2장에서는 압전 구동기의 모델링을 얻었으며, 3장에서는 극점 배치 방식을 기본으로 외란 관측기와 적분제어를 적용하여 제어시스템을 설계했다. 시뮬레이션과 실험의 결과를 4장에 기술하고 마지막으로 5장에 결론을 구성하였다.

2. 압전 구동기 모델

압전 구동기는 PI(Physik Instrumente)사의 z축 스테이지(P-753.11C)를 사용하였고, 그림 1은 DSA(Dynamic Signal Analyzers, HP 35670A)를 이용하여 얻은 주파수 응답이다. 이를 기준으로 2차의 시스템과 2차의 공진으로 모델링하면 식 (1)과 같다.

저자 소개

*漢陽大學 電子通信電波工學科 碩士課程

**漢陽大學 電子通信電波工學科 博士課程

***漢陽大學 電氣制御生體工學科 副教授·工博

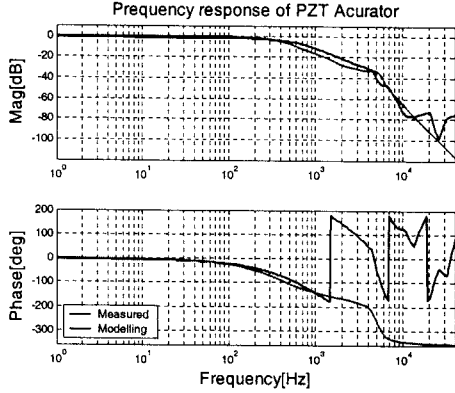


그림 1. Frequency response of the flexure hinge structure stage with piezo actuator

$$G(s) = \frac{\omega_1^2}{s^2 + 2\zeta_1\omega_1s + \omega_1^2} \cdot \frac{\omega_2^2}{s^2 + 2\zeta_2\omega_2s + \omega_2^2} \quad (1)$$

$$\zeta_1=0.9, \zeta_2=0.15, \omega=2\pi f, f_1=400\text{Hz}, f_2=5\text{kHz}$$

히스테리시스에 대한 모델링은 Banning이 고려한 1차 미분 방정식으로 모델링하여 식 (2)와 같이 표현한다.

$$\dot{u}(t) = -a u(t) + a d \int u(t) dt + b \dot{x}(t) \quad (2)$$

식 (2)에서 각 변수들은 $a=165.02\text{nm/V}$, $b=133.67\text{nm/V}$, $\alpha=0.023\text{V}^{-1}$ 이다[8].

3. 제어기 설계

식 (1)에서 공진성분을 제거한 2차의 시스템으로 부터 연속 시간 상태 공간 모델을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{x} = Fx + Gu \quad (3)$$

$$y = Hx$$

식 (3)을 ZOH를 이용해서 이산 상태 공간 모델로 변환하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$x(k+1) = \Phi x(k) + \Gamma u(k) \quad (4)$$

$$y(k) = Hx(k)$$

$$\Phi = e^{FT}, \Gamma = \int_0^T e^{Ft} dt G$$

시스템 (Φ, Γ, H) 는 제어 가능하고 관측 가능해야 한다. 식 (4)로부터 현재 추정기 모델은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\hat{x}(k) = \hat{x}(k) + L_c [y(k) - H\hat{x}(k)] \quad (5)$$

$$\hat{x}(k) = \Phi \hat{x}(k-1) + \Gamma u(k-1)$$

여기서 $\hat{x}(k)$ 는 현재 추정상태변수, $\hat{x}(k)$ 는 예측 상태변수, y 는 출력 측정 신호, L_c 는 현재 추정기 이득이다. 식 (4)와 식 (5)에서 현재추정오차 방정식은

$$\tilde{x}(k+1) = (\Phi - L_c H) \tilde{x}(k) \quad (6)$$

여기서 $\tilde{x}(k) = x(k) - \hat{x}(k)$ 는 추정 오차 상태이다. 폐환 제어 법칙(Feedback control law)은 식 (7)과 같이 정의할 수 있다.

$$u_p(k) = -K \tilde{x}(k) \quad (7)$$

식 (6)에서 현재 추정기 이득 L_c 를 설계하면 오차를 0에 수렴한다. 이때의 폐환 이득 K 는 Ackermann's 공식을 이용해서

얻는다. 기준 입력을 고려하여 정상상태에서 오차를 소거하는 제어 입력 신호는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$u_c(k) = -K \tilde{x}(k) - x_s + N_u r = -K \tilde{x}(k) + \bar{N} r \quad (8)$$

제어기로 극점 배치 방법만 사용하면 히스테리시스를 보상하지 못하기 때문에, 해결 방법으로 히스테리시스를 저주파 외란으로 고려하여 이를 제거하기 위해 add-on 방식의 상태공간 외란 관측기를 사용하였다. 여기서 사용한 외란 관측기는 외란에 의해 $y(k)$ 와 $\hat{y}(k)$ 에 차이가 생기는 만큼 거꾸로 빼주어 외란을 제거하는 구조이다. 이 구조는 loop shaping을 하여 민감도를 조정하기 때문에 주기적인 외란뿐 아니라 비주기적인 외란도 제거 가능하다. 이러한 특징을 가지기 때문에 비선형 특성인 히스테리시스를 선형 제어기를 사용하여 제거할 수 있다. 또한 분리 원리(separation principle)를 만족하여, 미리 결정된 제어기 및 추정기의 이득을 가지고도 제어기의 안정도나 제어기 및 추정기의 극점에 영향을 끼치지 않는다. 외란 관측기의 전달함수는 식 (9)와 같이 주어진다.

$$H(z) = \sum_{i=0}^{\infty} \alpha_i z^{-i} \quad (9)$$

여기서 α_i 는 외란 관측기 이득이고, k 은 외란 관측기의 차수이다. 외란 관측기를 포함한 제어법칙은 식 (10)과 같다[9].

$$u_p(k) = -K \tilde{x}(k) - \sum_{i=0}^{\infty} \alpha_i [y(k-i) - \hat{y}(k-i)] \quad (10)$$

민감도 함수 관점에서 시스템을 보면 적분 제어기를 추가할 때 영점과 극점을 각각 하나씩 추가하게 되므로 민감도 함수의 기울기는 외란 관측기만 적용했을 때보다 더 큰 기울기로 증가하게 된다. 따라서 저주파 외란에 대한 민감도를 더욱 향상시키기 위해 적분 제어기를 적용한다. 정상상태에서의 오차($e=y-r$)에 대한 적분 표현은 식 (11)과 같다.

$$x_f(k+1) = x_f(k) + \alpha e(k) = x_f(k) + H\alpha e(k) - r(k) \quad (11)$$

따라서 외란 관측기와 적분 제어기를 포함한 제어 입력 신호는 식 (12)와 같다.

$$u(k) = -[K_f, K] \begin{bmatrix} x_f(k) \\ \tilde{x}(k) \end{bmatrix} + K N_u r(k) - \sum_{i=0}^{\infty} \alpha_i [y(k-i) - \hat{y}(k-i)] \quad (12)$$

여기서 적분 이득 K_f 는 open loop transfer function에서 결정할 수 있다. 적분 이득 K_f 를 크게 하면 low frequency의 loop 이득을 크게 할 수 있어, 히스테리시스에 대한 보상이 가능하지만 시간응답에서 overshoot가 발생하게 된다. 그림 2는 시스템의 전체적인 블록 다이어그램이다.

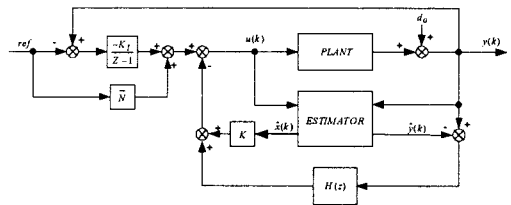


그림 2. Block diagram of the system

4. 시뮬레이션 및 실험

시뮬레이션을 위해 Matlab Simulink를 사용하였으며, 실험

을 위해 Control Board는 TI사의 TMS320VC33과 16bit ADC/DAC를 사용하였다. 이때 사용한 제어 입력 신호는 식 (12)와 같다.

그림 3과 그림 4는 극점 배치 방법에 의한 관측기와 적분 제어기를 적용했을 때 시스템의 시간 응답을 각각 시뮬레이션과 실험 결과이다. 이때 외란 관측기의 차수 n 은 1이며 적분 제어기 이득 K_I 값은 0.0005이다. 두 그림에서 위치를 나타내는 파형은 기준 입력을 추종하며, 히스테리시스에 대한 보상이 잘 이루어짐을 볼 수 있다.

그림 5에서는 DSA를 사용하여 극점 제어 방법만 적용했을 때, 외란 관측기를 적용했을 때, 그리고 외란 관측기와 적

는 저주파 영역에서 20dB의 기울기로 증가되는 것을 볼 수 있고 적분 제어기를 같이 적용한 제어기의 민감도 함수는 20dB보다 더 큰 기울기로 증가하는 것을 볼 수 있다. 따라서 적분 제어기를 같이 적용한 제어기가 저주파 외란에 대한 민감도를 더 많이 개선하여 히스테리시스 특성에 적격 영향 받는 것을 볼 수 있다.

5. 결론

본 논문은 압전 구동기의 위치 정밀도 향상을 위해 제어기를 설계하고 주파수 영역에서 분석하였다. 설계된 제어기는 비선형 특성인 히스테리시스를 보상하기 위한 선형 제어기로 극점 배치 방법을 기본으로 add-on 방식의 상태 공간 외란 관측기와 적분 제어기가 적용되었다. 제어기에 대한 시뮬레이션과 실험으로 제안한 제어기가 히스테리시스 특성을 보상하는 것을 보였고, 민감도 개선에도 효율적임을 검증하였다.

참고 문헌

- [1] K. Furutani and M. Urishibata, N. Mohri, "Improvement of control method for piezoelectric actuator by combining induced charge feedback with inverse transfer function compensation", Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol.2, pp. 1504-1509, 1998.
- [2] Krejci, P. and Kuhnen, K., "Inverse Control of Systems with Hysteresis and Creep", IEE Proc. Control Theory Appl., Vol.148, No.3, pp.185-192, 2001.
- [3] P. Ge and M. Jouaneh, "Tracking control of a piezoceramic actuator", IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 4, No. 3, pp.209-216, 1996.
- [4] T. Chang and X. Sun, "Analysis and control of monolithic piezoelectric actuator", IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol.9, No.1, pp.69-75, 2001.
- [5] Suh S.-M., Chung C. C. and Lee S.-H., "Discrete-Time Track Follow Controller Design Using State Space Disturbance Observer", Microsystem Technologies, Vol.9, pp.352-361, 2003.
- [6] S. Salapaka and A. Sebastian, J. P. Cleveland, M. V. Salapaka, "Design, identification and control of a nanopositioning device", Proceedings of the American Control Conference, Vol. 3, pp.1966-1971, 2002.
- [7] A. Sebastian and S. Salapaka, " H_∞ loop shaping design for nano-positioning", Proceedings of the American Control Conference, Vol. 3, pp.3708-3713, 2003.
- [8] 박재학, 정종철, 허건수, 정정주, "차세대 리소 그래피 시스템을 위한 압전구동기의 동적해석", 대한기계 학회논문집 A권, 제27권 제3호, pp.472-477, 2003.
- [9] Suh S.-M., Chung C. C. and Lee S.-H., "Discrete-Time Track Follow Controller Design Using State Space Disturbance Observer", Microsystem Technologies, Vol.9, pp.352-361, 2003.

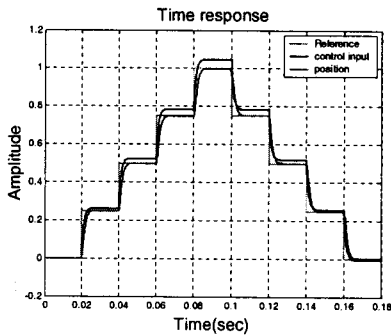


그림 3 Simulation result of proposed controller

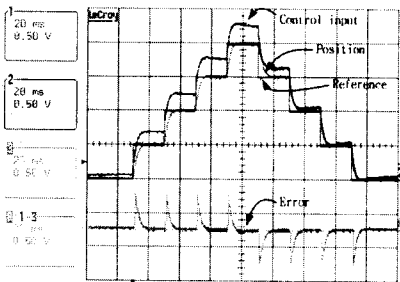


그림 4 Experiment result of proposed controller

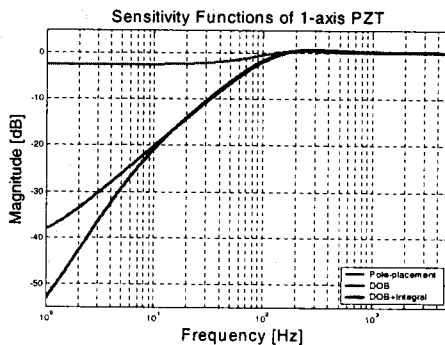


그림 5 Result of Sensitivity Function

분 제어기를 같이 적용했을 때 각각의 민감도를 측정하고 비교한 결과이다. 외란 관측기를 적용한 제어기의 민감도 함수