

압전소자 구동기의 모델링과 정밀제어를 위한 보상기 설계

김용출, 임준홍
한양대학교 전자전기제어계측공학

Modeling and Compensator Design for Piezoelectric Actuators

Yongchul Kim, Joonhong Lim
Dept. of Electronic, Electrical, Control and Instrumentation Engineering
Hanyang University
E-mail : drag07@aser.hanyang.ac.kr

Abstract

본 논문에서는 압전소자 구동기를 모델링 하고 이를 이용하여 제어를 설계하였다. 지금까지 많이 쓰이고 있는 방법이 압전소자 구동기의 히스테리시스 특성에 대한 대략적인 모델링을 구하고 이의 역함수를 적용한 방법이었으나 오차가 많고 다른 시스템에 대한 적용이 어려운 단점이 있었다. 이에 정확한 예측이 가능한 모델링 방법을 사용하여 제어기 설계의 정확성을 기하였다. 압전소자 구동기의 히스테리시스 특성을 제거하기 위한 방법으로는 Signal Preshaping 과 PI-제어기를 사용한 피드백 제어를 사용하였다. 이에 따른 모델링 시스템에서의 모사와 이를 실제 시스템에 적용하여 얻어낸 실험치와 그 결과에 대해서 논하였다.

I. 서론

압전소자는 전기에너지를 기계적 에너지로 변환할 수 있고 역 또한 가능한데 이는 나노 단위의 위치제어에 있어서 정밀한 움직임을 얻기에 적합하다. 압전소자 구동기의 장점을 살펴보면 무한대에 가까운 분해능을 가지고, 구동력이 크며 응답성이 좋다. 또한 자기장을 발생하지 않고 소비 전력이 작으며 내구력이 좋다. 이러한 압전소자 구동기는 생명공학, 반도체공학, 데이터

스토리지, 정밀기계공학 등에서 다양하게 쓰이고 있다. 압전소자 구동기는 open-loop 시스템에서 히스테리시스(Hysteresis) 특성과 크리프(Creep) 특성을 가지므로 오차를 발생하게 되고 이러한 오차를 줄이기 위하여 압전소자 및 구동기에 관한 연구가 현재에도 진행되고 있다.

본 논문에서는 상용의 압전소자 구동기를 모델링하고 이를 이용하여 정밀제어가 가능하도록 제어기를 설계하였다.

II. 압전소자 구동기의 모델링

2.1 히스테리시스 특성과 크리프 특성

그림 1 에서 보는 바와 같이 open-loop 시스템에서 압전구동기는 히스테리시스 특성과 크리프 특성을 가진다. open-loop 시스템에서 만들어지는 절대 변위는 입력되는 전압과 피에조 이득 값에 의한다. 이때 나타나는 히스테리시스 성질과 크리프 특성은 보통 10-15%의 오차를 발생시키고, 특히 히스테리시스 특성에 의해 주요한 오차가 발생한다.

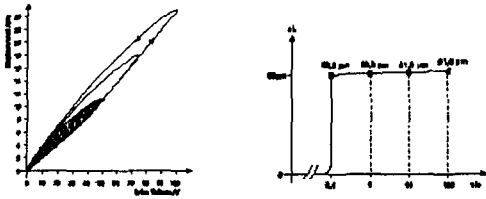


그림 1. open-loop 시스템에서 히스테리시스 특성과 크리프 특성

2.2 압전소자 구동기의 모델링

압전소자 구동기는 기계적인 동력 발생기로 볼 수 있다. 즉 전압이 입력되면 구동력이 생성되는 시스템이다. 이를 질량-스프링-댐퍼 시스템으로 표현하면 그림 2 와 같다.

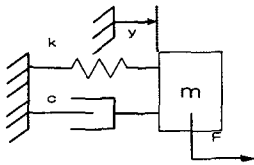


그림 2. 압전소자 구동기의 축약된 기계적 모델

이때 생성되는 힘과 움직이는 변위와의 관계식은 식(1) 과 같다.

$$\ddot{y} + 4\pi\epsilon f_0 \dot{y} + 4\pi^2 f_0^2 y = \frac{1}{m} F \quad (1)$$

이를 압전소자 구동기에서 입력전압 u 와 발생하는 힘 F 의 관계로서 나타내기 위해 Coleman-Hodgdon 방정식을 이용한다[1].

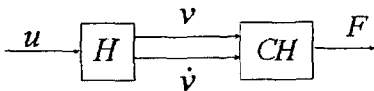


그림 3 HCH

그림 3 은 주어진 시스템 H 와 Coleman-Hodgdon 방정식을 이용하여 u 와 F 를 나타낸 것이고 이로부터 식(2) 를 유도할 수 있다.

$$\dot{F} = a \left| \dot{u} \right| (f(u) - F) + \dot{u} g(u) \quad (2)$$

이때,

$$f(u) = D_1 \arctan(D_2 u) \quad (3)$$

$$g(u) = \frac{D_1 D_2}{1 + (D_2 u)^2} (1 - D_3 e^{-D_4 |u|}) \quad (4)$$

이며 (3)과 (4)에서 각각의 상수값 $\alpha, D_1, D_2, D_3, D_4$ 는 P840.3 압전소자 구동기의 실험치로부터 다음과 같은 값을 가진다.

$$\alpha = 3.98e-3, \quad D_1 = 5.23e3, \quad D_2 = 2.92e-3, \\ D_3 = 8.22e-1, \quad D_4 = 1.23e-3$$

그리고 시스템 H 의 관계식은 식 (6)와 같다.

$$H = \frac{1}{2.53e-5s^2 + 2.25e-1s + 1} \begin{bmatrix} 1 \\ s \end{bmatrix} \quad (5)$$

따라서 구해지는 전체 식은 다음과 같다[1].

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -3.95e7 & -8.89e3 & 5.21e-1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -3.95e7 & -8.89e3 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \varphi(x_{1,3,5}) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 3.95e7 \end{bmatrix}$$

$$y = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] x \quad (6)$$

이때 $x = [y \ \dot{y} \ F \ v \ \dot{v}]$ 이며,

Coleman-Hodgdon 방정식은

$$\varphi(x_{3,4,5}) = \alpha |x_5| (f(x_4) - x_3) + x_5 g(x_4) \quad (7)$$

이다.

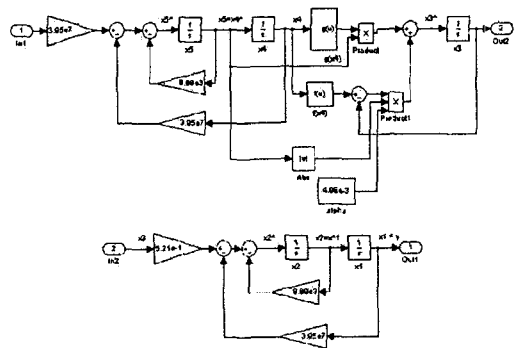
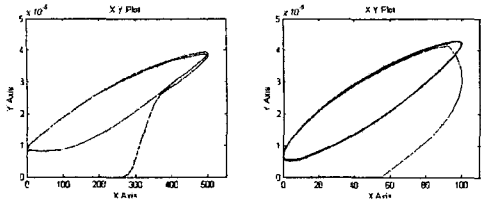


그림 4. 모델링 시스템의 블록도



a. 모델링에서 입출력 특성 b. 실제 시스템에서 입출력 특성

그림 5. 모델링 시스템과 실제 시스템의 입출력 특성

그림 4와 그림 5는 모델 식을 시스템 블록 다이어그램으로 구현하고 입출력 특성을 나타낸 것이다. 이때 얻어지는 시스템 특성은 실제 시스템의 히스테리시스 특성을 잘 반영하고 있음을 알 수 있다.

2.3 모델링 시스템의 입출력 특성과 제어

모델링 시스템에서 입력 및 출력은 그림 6과 같다.

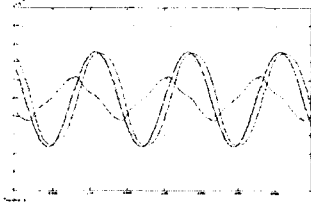


그림 6. 모델링에서의 입력경로와 출력 및 오차

그림 6에서 보는 바와 같이 원하는 경로에 대한 출력은 위상과 그 크기가 변형되어 오차를 발생하게 된다. 이를 보상하기 위하여 1) Signal Preshaping 을 적용하고 2) PI-제어기를 사용한 피드백 제어를 적용한다.

1) Signal Preshaping

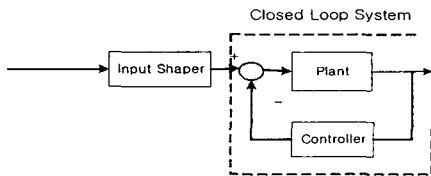


그림 7 Signal Preshaping 동작도

그림 7은 Signal Preshaping의 동작도이다. Signal Preshaping은 진동하는 시스템에서 여자 주파수의 측정만으로 오차를 줄일 수 있는 매우 효과적인 방법이다

[2]. 이의 구현은 Convolve 사의 Input ShaperTM를 사용하였다.

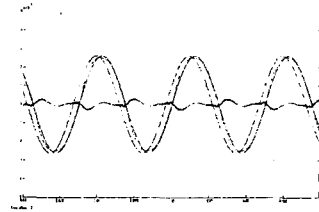


그림 8. Signal Preshaping 적용시 입력경로와 출력 및 오차

그림 8에서 Signal Preshaping 적용시의 출력 및 개선된 오차를 나타내었다.

2) PI-제어기를 이용한 피드백 제어

다음으로 나머지 오차를 줄이기 위해서 PI-피드백 제어를 추가한다. PI-피드백 제어에서 계수 결정을 위한 방법으로는 지글러-니콜스 자동조정법을 사용하였다[4].

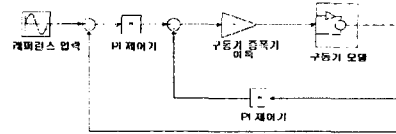


그림 9. PI-피드백 제어 시스템 구성

그림 9와 같이 PI-피드백 제어 시스템을 구성하고 이득 값 K_p 와 K_i 를 구하기 위해서 먼저 K_p 값을 0에서부터 증가시키면서 출력에 지속진동이 나타나는 임계이득에 이르게 한다. 다음으로 이에 대응하는 지속진동의 임계 주기를 구하여 이로부터 K_p 값과 K_i 값을 적절히 선택할 수 있다. 주어진 모델의 시스템에서는 각각 $1.323e3$, $1.5132e-1$ 로 구해진다.

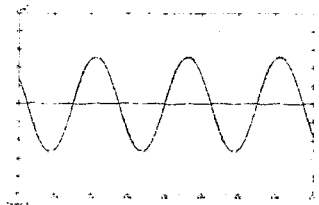


그림 10. PI-제어기 피드백 제어시 입력경로와 출력 및 오차

그림 10 에서 Signal Preshaping 과 주어진 이득값을 가지고 PI-제어기 피드백 제어시 원하는 출력을 얻을 수 있음을 볼 수 있다.

III. 실험 및 측정

모델링에서의 결과를 실제의 압전소자 구동기 시스템에 적용하였다. 그림 11 은 실험을 위한 시스템 구성도를 나타내고 표 1 은 실험에 사용된 장비들이다. 여기서 제어 컴퓨터는 예상경로에 따른 입력신호 신호 생성과 레이어 변위기에서 출력되는 측정신호로부터 제어신호 연산 및 생성의 역할을 한다. 또한 Input Shaper™ 와 PI 제어기 블록 등 제어 블록을 포함하여 연산한다.

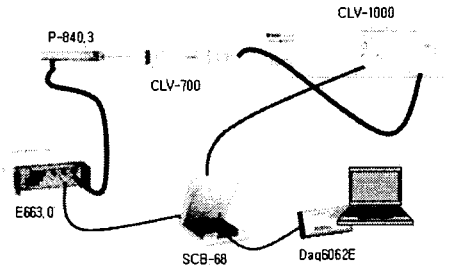


그림 11. 실험에 쓰인 시스템 구성도

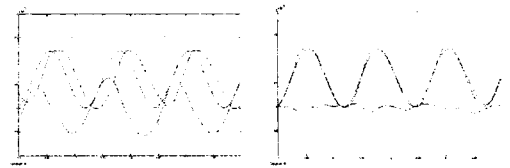
표 1. 제어장치의 구성 사양

	모델명	비고
압전구동기	PI, P-840.3	최대변위 45 μ m
전압 증폭기	PI, E663.0	0~100V
DAQ 카드	NI, Daq6062E	12bit, 500kS/s
입출력 모듈	NI, SCB-68	
변위 센서	Polytec, CLV-700	Laser 변위기
센서 제어기	Polytec, CLV-1000	5mm/V

그림 11 에서 주어지는 입력경로는 크기가 0~45 μ m , 주파수가 80Hz 인 정현파이다. 압전구동기에 실제 입력 되는 전압은 0~100V 의 신호로 증폭된다.

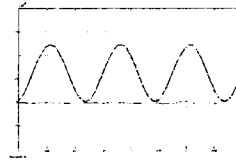
그림 12-a.에서 제어를 하지 않았을 때 입력과 출력간에는 위상차와 출력변위의 변화 때문에 발생하는 오차가 상당히 크다. 그림 12-b. 와 12-c. 에서 Signal Preshaping 을 적용하고 PI-제어기를 적용하였을 때의 개선된 오차를 확인할 수 있다. 그림 12-d. 에서는 최종적으로 제어된 압전소자 구동기의 입출력 특성이 선형화된 것을 보여준다. 실제 시스템에서 오차는

100 μ m 이하이다.

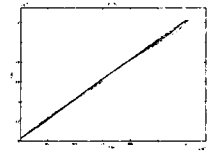


a. 입력경로와 출력 및 오차

b. Signal Preshaping 적용



c. PI-제어기 적용



d. 시스템에서 입출력 특성

그림 12 실제 시스템에서의 실험치

IV. 결론

본 논문에서는 실제의 압전소자 구동기의 정확한 모델링을 선택하여 모의 실험을 통하여 적절한 제어방법을 선택 하였다. 이를 바탕으로 실제 실험을 함으로써 제어하기 어려운 압전소자 구동기의 정밀제어를 가능하게 하였고, 오차를 100 μ m 이하로 줄일 수 있었다. 앞으로 이를 이용한 매니퓰레이터의 구현 등이 연구되어야 하겠다.

참고문헌

- [1] J.M.T.A. Adrians, W.L. de Konig and R. Banning, " Design and Modeling of a Piezo-Actuated Positioning Mechanism", IEEE Conference on Decision & Control, 1997, p.1978 -1983 vol.2
- [2] Jonathan Y. Smith, " Input Shaping for a Simple Nonlinear System", IEEE American Control Conference, 2002, p.821 -826 vol.1
- [3] " MicroPositioning, NanoPositioning, NanoAutomation Solutions for Cutting Edge Technologies", PhysikInstrumente
- [4] R.OubRahim, F.Leonard, " PID Auto-Tuning by a Composed Structure", IEEE Conference on Control Applications, 1998, p.144 -147 vol.1