

정밀 위치제어를 위한 Piezo Actuator의 제어기 연구 및 제작

이세린*, 김철오*, 임계영**

한국산업기술대학교 에너지대학원 전기공학과*, 한국산업기술대학교 에너지전기공학과교수**

A Controller Study and Design for Precise Piezo Actuator

Se-Rin Lee*, Cheol-Oh Kim*, Kye-Young Lim**

Electrical Engineering Graduate School of Energy, Korea Polytechnic University*,
Professor, Energy and Electrical Engineering, Korea Polytechnic university**

Abstract - 피에조 액추에이터는 세라믹 소재의 압전 특성을 이용한 전기식 액추에이터로, 이에 사용되어지는 세라믹스는 전자분야의 기초재료로 다양한 연구가 이루어지고 있다. 통신기기, 의료기기, 초정밀 액추에이터, 조음과 모터 등 각종 정밀 센서와 측정·계측기와 같이 가정용에서부터 첨단 기술 분야 까지 광범위하게 이루어지고 있다.

이와 같이 첨단 기술 분야에 각광 받고 있는 압전 소재 제품 중, 본 논문에서는 국내 개발 및 시장 진입이 어려운 초정밀 액추에이터를 선택 하였으며, 전압 이송소자를 활용하기 위한 연구 소단위의 연구내용을 기술하였다. 즉, 정밀 제어에 영향을 미치는 피에조의 히스테리시스를 포함한 개루프 특성을 모델링하고, 컴퓨터 시뮬레이션으로 액추에이터의 동작을 검증한 후 PID제어기를 적용하여, 이에 따른 결과와 함께 제어기를 제작하였다.

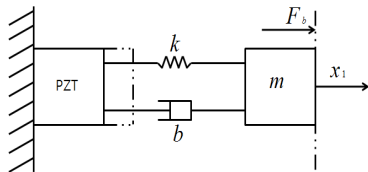
1. 서 론

나노급 분해능의 필요성과 고강성 그리고 빠른 응답성의 필요로 피에조 액추에이터가 고정밀 구동장치에 자주 사용되어진다 [1]. 이러한 피에조 액추에이터에 쓰이는 물질은 강유전체로 되어 있으며, 이들은 본래 히스테리시스 특성을 보여 준다. 따라서 피에조 액추에이터를 개루프에서 작동 시켰을 때, 이 특징으로 인하여 명령 수행 시 어려움이 있거나 정밀하게 구동되지 않는다는 문제점을 가지고 있다[2].

이를 해결하기 위해 본 논문에서는 선택한 피에조 액추에이터를 모델링하고, 적절한 상수 값을 구하여 실제 제품의 특성과 동일함을 확인하였다. 그리고 나노급 분해능을 갖는 정밀 위치소자를 활용하기 위하여 일반적인 PID 제어방법을 선택하였다. 산업현장에서도 널리 쓰이는 이 PID제어를 이용하여 액추에이터가 갖는 히스테리시스나, 크리프 현상 등 외부에 민감한 비선형적인 성질을 보상 할 수 있었으며, 이러한 성질들을 가지고 시뮬레이션을 통하여 제어기를 제작하였다.

2. 본 론

2.1 Piezo Actuator의 히스테리시스를 포함한 운동 방정식



<그림 1> 피에조 기본 구동 구조

위의 그림은 피에조의 구동원리를 간략하게 보여주는 그림으로서 운동 방정식을 나타내면 다음과 같이 선형 식으로 나타낼 수 있다[3].

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = k(d_e u - h) \quad \dots\dots(1)$$

여기서, m, b, k 와 d_e는 질량, 댐퍼, 강성 그리고 피에조 상수로서 입력 전압과 액추에이터의 변위 x에 의해 결정되며, u는 액추에이터 시스템에 여진 압력을 발생시키는 입력 전압이다. 변위 x는 액추에이터의 변위이고, 이 시스템에서 알 수 있는 유일한 측정값이다. 변수 h는 히스테리시스의 비선형 역학 식으로

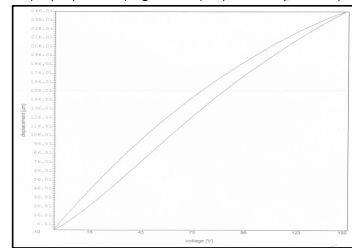
다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{h} = \alpha d_e \dot{u} - \beta \dot{u} |h| - \gamma |h| \quad \dots\dots(2)$$

식(2)에서의 α, β, γ는 고정된 상수 값으로 α는 복원력 진폭을 제어하고, β, γ는 히스테리시스루프의 모양을 제어한다[4].식(1),(2)에 대한 자세한 설명은 논문[5]을 참조하기 바란다.

2.2 Parameter Turning

본 연구에서는 피에조 액추에이터, Piezosystem Jena의 MIPOS 250SG 모델을 사용하여 실험을 하였다. 이 액추에이터의 사양과 히스테리시스 특성은 아래 <그림2>와 <표1>과 같다.



<그림 2> MIPOS-250SG의 히스테리시스곡선

<표 1> MIPOS-250SG사양

	open-loop	close-loop
motion	250 μm	200 μm
resolution	0.5nm	5nm
stiffness	0.4N/μm	
integrated measurement system	strain gauge	

위 <표1>과 같은 사양과 히스테리시스 곡선 및 제공하는 피에조 액추에이터의 특성을 이용하여 구한 식 (1), (2)에 해당하는 상수 값들은 아래와 같다.

히스테리시스 및 모델링 상수 값

$$\begin{aligned} m &= 0.23kg \\ b &= 1.169 Ns/m \\ k &= 4.00752 \times 10^8 N/m \\ d_e &= 1.923 \times 10^{-6} m/v \\ \alpha &= 0.4297 \\ \beta &= 0.030942 \\ \gamma &= -5.73 \times 10^{-3} \end{aligned}$$

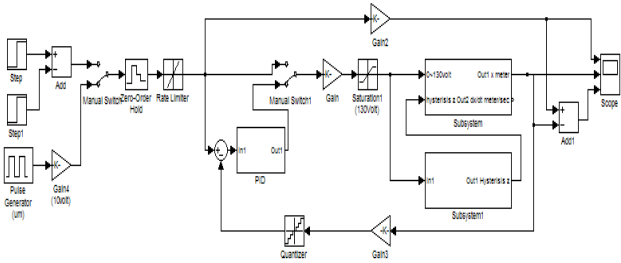
여기에서 m은 0.125kg인 Load를 포함한 effective mass이다. 위의 일반 모델링 식에 위에서 구한 상수를 대입하고, 히스테리시스 효과를 무시한 경우의 전달 함수를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} G(s) &= \frac{k d_e}{m s^2 + b s + k} = \frac{\frac{k}{m} d_e}{s^2 + \frac{b}{m} s + \frac{k}{m}} \\ &= \frac{\omega_n^2 d_e}{s^2 + \zeta \omega_n s + \omega_n^2} = \frac{1320^2 d_e}{s^2 + 132s + 1320^2} \\ &= \frac{3.3506352}{s^2 + 132s + 1742400} \quad \dots\dots(3) \end{aligned}$$

(3)식을 적용하여 시뮬레이션 블록도를 작성 하였다.

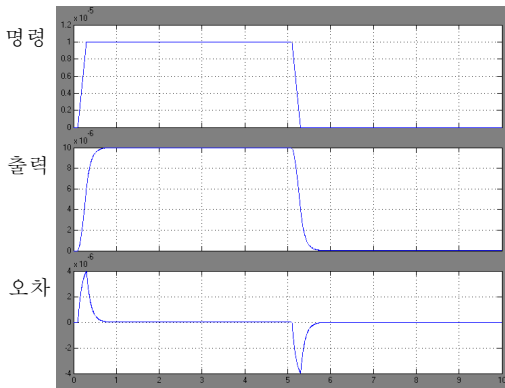
2.3 PID 제어기 컴퓨터 시뮬레이션

히스테리시스를 포함한 모델링 식을 이용하여 PID 제어기를 구성하였다. 이는 PID제어를 이용하여 히스테리시스가 제거되는지의 시스템 성능을 알아보기 위함이다. 아래 <그림3>은 PID 시뮬레이션을 구성한 것이며, MATLAB의 SIMULINK블록 선도이다.



<그림 3> 전체 시뮬레이션 블록도

명령은 0~250μm범위 내에서 입력을 주며 이 입력 값은 0~10V 사이의 전압 값으로 전환되어 PID입력 값으로 들어가게 된다. 다음 <그림4>는 PID제어기를 실행 하였을 때의 결과이다.

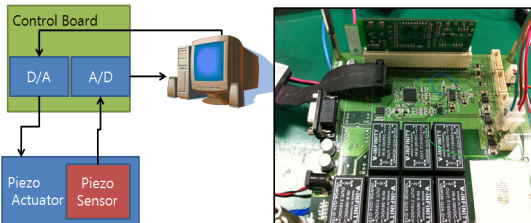


<그림 4>PID 시뮬레이션 실행결과

<그림4>의 그래프는 위에서부터 순서대로 입력 그래프, 출력 그래프, 입력과 출력의 차이 그래프 순으로 나타내었다. 입력 값은 10μm로 하였으며, PID 게인 값은 각각 0.8, 10, 0.002이며, Rate Limit는 2.5이다.

2.4 피에조 컨트롤러 구성 및 제작

피에조 컨트롤러 구성을 보자면, PID 프로그램을 작성 한 후, PC에서 원하는 위치 값이나 전압 값으로 명령을 보내주면 명령 값이 DAC된 다음 증폭기를 거쳐 피에조액추에이터로 명령이 인가된다. 명령으로 인해 변화된 변위 값은 스트레인게이지가 센싱을 하여 ADC되어 PC로 전달된다. 전달된 ADC값은 액추에이터에서의 변위 값으로 PC에서 디스플레이를 할 수 있다.

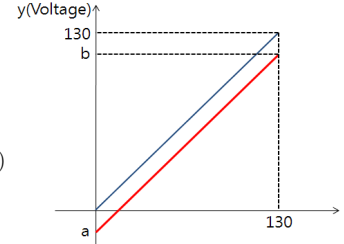


<그림 5> 하드웨어 블록도 및 실제 컨트롤러 보드

이 실험 장치에 사용한 ADC는 Analog Devices의 AD7656을 사용 하였으며, DAC는 동일 사의 AD5752를 사용 하였다. 여기서 가장 중요한 앰프는 APEX사의 PA78DK를 사용하여 신호를 증폭하였다. 하드웨어 상에서 발생하는 노이즈나 외부 환경에 의해 발생하는 비선형성으로 오프셋이 나타난다. 이렇게 발생하는 오프셋은 보정 식을 통하여 다음과 같이 조정 할 수 있다.

$$y = \frac{b-a}{130}x + a \dots\dots(3)$$

$$y' = \frac{130}{b-a}x' + \frac{130}{b-a}a \dots\dots(4)$$



<그림 6> 오프셋에 의한 출력 전압

식(3)은 <그림6>에서 특정한 오프셋 값 a, b를 포함한 직선 식이다. 본 실험에서는 오프셋 값을 보정하기 위하여 식(4)를 적용하였다.

3. 결 론

피에조 액추에이터는 압전 효과로 인해, 사용에 있어 압전 센서의 물성치로 인하여 온도, 사용 빈도수, 외부 자극에 의해 그 값이 변하며, 히스테리시스나 크리프라는 비선형적인 성질로 인해 명령 추종이 어렵다는 문제가 발생한다. 이러한 비선형성들은 정확한 위치제어가 어렵기에 이러한 문제점을 해결하기 위한 모델링 방법과 보상을 위한 여러 가지 연구가 이루어져 왔다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 본 논문에서는 5nm의 분해능의 초정밀 구동장치에 사용하는 액추에이터로 모델링을 수행하였고, 컨트롤러를 제작하였다. 이러한 초정밀 구동장치는 히스테리시스와 같은 비선형적 성질이 더 강하게 나타나 정확한 모델링을 필요로 하였다. 그리하여 본 논문에서는 피에조 액추에이터의 특성을 제거하기 위하여 PID제어를 선택하였다.

향후, 대상 장치에 대한 최적의 PID값을 실험을 통하여 구할 것이며, 다른 외부 환경에 따라 어떤 문제점들이 발생하는지에 대해 데이터를 수집 할 것이다. 더 나아가, PID 제어 외에 피지 제어, 적응 제어 등 고급제어를 연구함으로써 정밀제어 시스템의 성능에 만족 할 수 있을 것을 기대 한다.

[참 고 문 헌]

[1] F.-J. Lin, H.-Jo Shieh, P.-K. Huang, and L.-T. Teng, "Adaptive control with hysteresis estimation and compensation using RFNN for piezo-actuator," IEE Trans.on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, pp.1649-166, Vol.53, No.9, 2006,
 [2] H.-J.Shieh and P.-K.Huang, "Precise trackin of a piezoelectric positioning stage via a filtering-type sliding-surface control with chattering alleviation," IET Control Theory Appl., pp.586-594, Vol.1, No.3, 2007
 [3]T.S.Low and W.Guo, "Modelling of a threelayer piezoelectric bimorph beam with hysteresis,"Journal of Microelectromechanical Systems, Vol.4, No.4, December 1995,
 [4] T.S.Low, Senior Member, IEEE,and W.Guo, "Modeling of a Three-Layer Piezoelectric Bimorph Beam with Hysteresis", Journal of Microelectromechanical Systems, Vol.4, No.4, December 1995
 [5] B.M.Chen, T.H.Lee, C.C.Hang, Y.Guo,"An H_∞ Almost Disturbance Decoupling Robust Controller Design for a Piezoelectric Bimorph Actuator with Hysteresis",
 [6] PiezosystemJena Vol.5, pp84-106
 [7] P.Ge and M.Jouaneh, "Tracking control of a piezoceramic actuator", IEEE transactions on control systems technology, Vol.4, No.3, 1996