

## 압전형 액추에이터의 위치제어 특성 향상

성백주 이은웅<sup>o</sup> 이재규  
한국기계연구원 충남대학교<sup>o</sup>

### Improvement of displacement control performance for piezoelectric actuators

Baek-Ju, Sung Eun-Woong<sup>o</sup>, Lee Jae-Gyu, Lee  
Korea Institute of Machinery and Materials Chung Nam National University<sup>o</sup>

**Abstract** - For the displacement control of piezoelectric actuator, this paper proposed a method of designing the control algorithm, and presents the dynamic modeling equations which represent the hysteretic behavior between input voltage and output displacement. For this process, the piezoelectric actuator is treated as second-order linear dynamic system then a classical PID controller is designed and used to regulate the output displacement control of the actuator. To evaluate the performance of the proposed method, numerical simulation results were presented

#### 1. 서 론

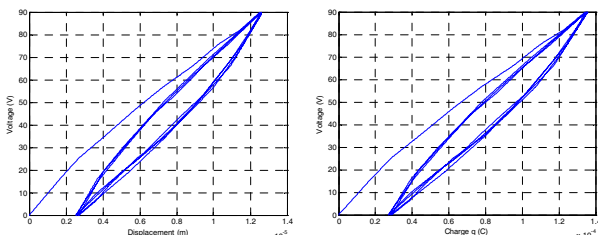
압전 세라믹(Piezo ceramic)은 전기적 에너지와 기계적 에너지를 상호 변화하는 성질을 갖는 소재로 산업분야에서 온도 및 압력 계측 센서, 초음파 진동자, 압전 모터, 압전 액추에이터의 형태로 응용되어 사용되고 있다. 특히 압전형 액추에이터(Piezoelectric actuator)는 기존의 솔레노이드 방식 액추에이터에 비해 노이즈 영향이 적고 빠른 응답특성을 갖으며, 저 소비전력의 소형 액추에이터로 구현이 가능하다는 장점이 있어, 최근 초정밀 위치제어용 액추에이터의 소재로 각광받고 있다.

압전 세라믹이 갖는 고유의 유전체 특성은 압전형 액추에이터의 입력 전압과 출력변위 사이에 히스테리시스(Hysteresis) 현상을 야기시킨다. 압전형 액추에이터의 히스테리시스 현상은 압전 세라믹이 갖는 탄성-가소성 성질에 따른 응력-변형 특성과, 자기물질에서 발생하는 자기장과 자속밀도간의 관계적 특성이 상호 결합하여 나타난다. 이와 같은 현상은 압전형 액추에이터의 위치 정밀도 저하를 일으켜 액추에이터가 사용되는 시스템의 응답정밀도에 증대한 영향을 미친다. 본 연구에서는, 압전형 액추에이터의 입력전압과 출력변위간에 발생하는 히스테리시스 현상을 분석하고 이를 제어하는 제어알고리즘을 구성하였다. 압전형 액추에이터의 응답 특성을 2차의 선형시스템으로 가정하고, 전압-변위간의 시험 데이터와 시스템 ID 기법을 통해 수치 선형화를 수행하였다. 액추에이터의 위치 제어를 위해 고전적인 PID 제어 기법을 기반으로 제어를 설계하였으며, 전체 시스템의 안정성 확보를 위한 PID 이득(Gain) 값을 정하였다. 수치 시뮬레이션을 수행하여 논문에서 제안한 모델링 기법 및 제어 알고리즘의 타당성을 검증하였다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 압전형 액추에이터의 히스테리시스 특성

압전형 액추에이터는 입력전압에 대한 출력변위 및 출력힘을 향상시키기 위해 일반적으로 세라믹 웨이퍼(Wafer)와 전극막대(Electrode)를 여러 층으로 접합한 구조를 갖으며, 액추에이터의 출력변위는 적층한 웨이퍼 수에 비례하여 증가한다. 압전 세라믹이 갖는 유전체 특성으로 인해 나타나는 고유의 히스테리시스 현상은 액추에이터의 위치 정밀도에 영향을 미친다. 그림 1은 압전형 액추에이터의 입력전압에 대한 액추에이터 끝단의 변위와 전하량 변화를 나타낸 것으로 입력전압과 출력변위간에 히스테리시스 현상이 나타남을 확인할 수 있다.



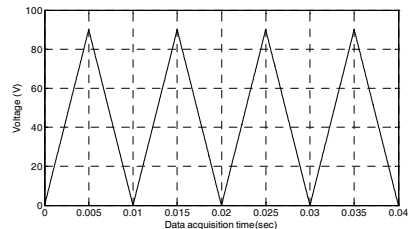
〈그림 1〉 입력전압과 출력변위(전하량)간의 히스테리시스 현상

##### 2.2 시스템 모델링

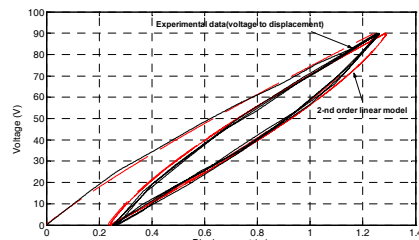
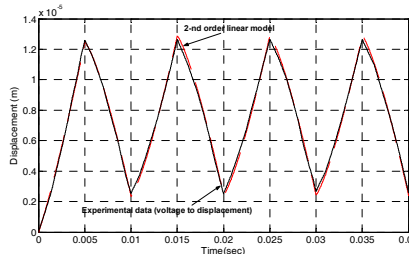
압전형 액추에이터의 전압-변위간의 히스테리시스 현상은 물질에 저장된 에너지가 소산되는 과정에서 발생하며, 세라믹 결정의 분극 효과와 분자간의 마찰현상이 결합하여 나타나는 전압-전하량간의 비선형 현상의 영향으로 야기된다. 압전형 액추에이터의 히스테리시스 모델링에 관한 연구가 기존에 수행된바 있으나[1], 비선형 모델이라는 점에서 액추에이터의 위치제어 알고리즘 설계를 위해 직접적으로 적용하기 매우 까다로운 단점이 있다. 본 연구에서는 압전형 액추에이터의 위치제어 알고리즘을 구성하기 위해 시스템의 선형 모델을 다음과 같이 정의하였다. 압전형 액추에이터의 입력전압과 출력변위간의 응답특성을 2차의 선형 시스템으로 간주하여, 시스템의 운동방정식을 식 (1)로 정의하였다.

$$\begin{aligned} \dot{X} &= AX + BV \\ Y &= CX \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,  $V$ 는 입력전압,  $X$ 는 출력변위를 각각 나타낸다. 수치 선형화를 위해 본 연구에서는 압전형 액추에이터의 전압-변위간 시험 데이터와 시스템 ID 기법을 사용하였다. 먼저, 압전형 액추에이터에 입력전압을 인가하고 출력되는 액추에이터 끝단의 변위를 측정한다. 시험을 통해 획득한 전압-변위 데이터를 Matlab에서 제공하는 System ID Toolbox의 시스템 ID 기법을 이용하여 식 (1)의 시스템 상수,  $A, B, C$ 를 구한다[2] 그림 2의 90V-100Hz 입력전압에 대한 액추에이터의 출력변위와 시스템 ID를 통해 2차의 선형 시스템으로 모델링한 결과를 그림 3에 도시하였다.



〈그림 2〉 압전형 액추에이터의 입력전압 (90V-100Hz)



〈그림 3〉 압전형 액추에이터의 선형 모델 결과

그림 3의 결과를 통해 액추에이터의 전압-변위간 시험데이터와 식 (1)의 2차 선형 모델링 결과가 매우 유사함을 확인할 수 있으며, 히스테리시스 특성 또한, 잘 표현됨을 확인할 수 있다. 본 연구에서 사용한 식 (1)의 시스템 상수는 표 1에 정리하였다.

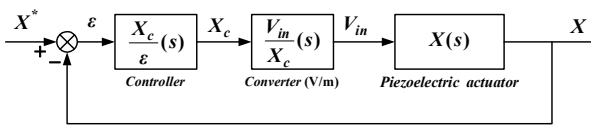
〈표 1〉 시스템 상수 (A, B, C)

A	B	C
$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1.9512 \times 10^7 & -57018 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.00591 \\ -333.55 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}$

### 2.3 위치제어 알고리즘 설계

#### 2.3.1 선형 시스템 구성

본 연구에서는 압전형 액추에이터를 그림 4의 블록 다이어그램으로 나타내었다. 블록 다이어그램은 세부적으로 액추에이터의 출력변위와 입력력변위간의 오차를 최소화 하기위한 제어기와 제어기를 통해 나온 위치 명령을 액추에이터에 적용하기위한 변환기, 그리고 액추에이터의 2차 선형 시스템 모델로 구성된다.



〈그림 4〉 압전형 액추에이터의 시스템 블록 다이어그램

블록 다이어그램은 출력변위  $X$ 와 입력변위  $X^*$ 간의 오차를 최소화하는 피드백(Feed-back) 시스템으로 구성되어있으며, 위치제어를 위해 고전적인 PID 제어방식을 사용하였다. 블록 다이어그램의 각 구성요소에 대한 전달함수는 식 (2)-(4)와 같다.

$$\frac{X_c}{\epsilon}(s) = K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s \quad (2)$$

$$\frac{V_{in}}{X_c}(s) = T \quad (3)$$

$$X(s) = C(sI - A)^{-1} B \quad (4)$$

여기서,  $K_p$ ,  $K_I$ ,  $K_D$ 는 PID 제어기의 이득값(Gain),  $T$ 는 전압-변위 상수,  $A$ ,  $B$ ,  $C$ 는 표 1에 정의된 시스템 상수를 각각 나타낸다.

#### 2.3.2 PID 제어기 설계

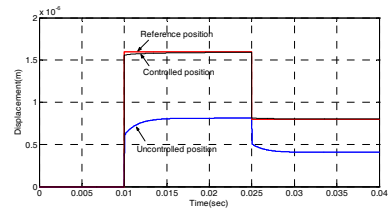
시스템의 과도 응답 및 정상상태 응답오차를 최소화 하는 PID 제어기의 이득값(Gain)은 Routh-Hurwitz 안정 조건을 이용하여 전체 시스템의 안정성을 보장하는 이득값의 범위를 정하는 방법이 있으나[3], 시스템의 오차를 최소화하는 이득값의 선정 범위가 매우 광범위하다는 단점이 있다. 본 연구에서는 PID 제어기의 이득값 선정을 위해 최적화(Optimization) 기법을 사용하였다. 먼저, 그림 4의 폐루프 시스템의 전달함수를 Routh-Hurwitz 안정 조건에 적용하여 PID 시스템의 안정성을 보장하는 이득값의 범위를 설정하고, 최적화 단계로서 액추에이터의 출력변위  $X$ 와 입력변위  $X^*$ 간의 오차를 최소화 하는 가격 함수(Cost function)를 식 (5)와 같이 설정하였다.

$$J = \int_0^{\infty} (X - X^*)^2 dt \quad (5)$$

식 (5)의 가격함수  $J$ 를 최소화함으로써 결론적으로 입력변위와 출력변위간의 응답 오차를 최소화 할 수 있다. PID 이득값을 정하기 위해 본 연구에서는 Matlab에서 제공하는 Optimization Toolbox를 사용하였다[4]. 그림 5는 시간에 따른 압전형 액추에이터의 입력변위와 출력변위를 나타낸 것으로, 최적화 기법으로 선정한 PID 이득값으로 액추에이터의 응답 오차가 개선됨을 확인할 수 있다. 최적화 기법으로 계산한 시스템 PID 이득값은 표 2에 정리하였다.

〈표 2〉 시스템의 PID 이득값

PID gain values		
$K_p$	$K_I$	$K_D$
10.3147	$6.0 \times 10^3$	2.4951



〈그림 5〉 시스템의 PID 제어 결과

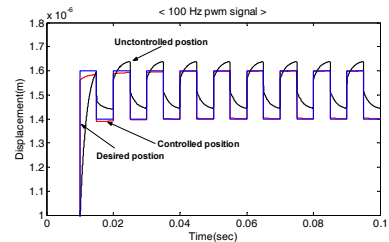
### 2.4 압전형 액추에이터의 위치제어 성능 분석

선형 시스템을 기반으로 설계된 PID 제어기의 위치제어 성능분석을 위해 수치 시뮬레이션을 수행하였다. 압전형 액추에이터의 입력전압 범위는 0에서 150V, 출력변위는 0에서 20 $\mu$ m이며, 수치 시뮬레이션에 사용된 변수는 표 3에 정리하였다.

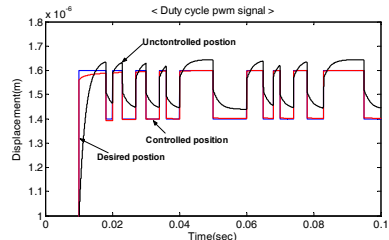
〈표 3〉 시뮬레이션 변수

Parameters	Symbols	Values
질량	$m$	0.004 kg
전압-변위 상수	$T$	$6.173 \times 10^6$ (V/m)

그림 6는 입력변위 100Hz, 1.5 $\mu$ m의 PWM 신호에 대한 응답결과를 나타낸다. 압전형 액추에이터 끝단의 변위가 본 연구에서 설계한 PID 제어를 통해 입력변위를 잘 추종함을 확인할 수 있다. 그림 7은 Duty cycle PWM 신호에 대한 응답 결과를 나타낸 것으로, 입력변위가 가변적인 형태를 갖더라도 PID 제어를 통해 액추에이터의 위치제어가 효과적으로 이루어짐을 확인할 수 있다.



〈그림 6〉 100Hz, 1.5 $\mu$ m PWM 신호에 대한 시스템의 응답 결과



〈그림 7〉 Duty cycle PWM 신호에 대한 시스템의 응답 결과

## 3. 결론

본 연구에서는 압전형 액추에이터의 전압-변위간 히스테리시스 특성을 2차 선형 시스템으로 간주하고 시스템 ID 기법으로 선형 모델을 구성하였으며, 위치제어를 위해 고전적인 PID 제어기를 설계하였다. 시스템의 안정성 분석과 최적화 기법을 사용하여 응답오차 개선을 위한 PID 이득값을 정하고, 수치 시뮬레이션을 통해 본 연구에서 제안한 제어 알고리즘의 타당성을 검증하였다.

### 〈참고 문헌〉

[1] Goldfarb, M., and Celanovic, N., 1997, "Modeling Piezoelectric Stack Actuators for Control of Micromanipulation," IEEE Control Syst. Mag., 17, pp. 69-79.  
 [2] Lennart Ljung, "System Identification Toolbox", The Mathworks, User's Guide, Version 6, 2005  
 [3] Norman S. Nise., "Control Systems Engineering", Jhon Wiley & Sons, FourthCh. 6, 2004  
 [4] The Mathworks, "Optimization Toolbox for Matlab", Tutorial for Users, 2004