

# PZT 구동 나노 정밀도 스테이지를 위한 퍼지 제어기 개발

하호진\*, 정규원<sup>+</sup>

(논문접수일 2009. 3. 3, 심사완료일 2009. 3. 31)

## Fuzzy Controller Design for a Nano Precision Stage Driven by a PZT

Hojin Ha\*, Kyuwon Jeong<sup>+</sup>

### Abstract

An ultra-precision stage is used in many industrial areas such as precision machine tools or semiconductor apparatus. These stages used to be driven by piezoelectric actuators in order to obtain ultra precision positioning resolution. Piezoelectric actuator can be moved fast in nanometer resolution. However, it has relatively large non-linear characteristics like hysteresis and creep curve. Although several kinds of control techniques have been developed, controller design method is still complicated. In this paper fuzzy control rules are developed intuitively. In order to verify the performance a series of experiments were conducted and the results were compared with those of the PID controller case.

**Key Words** : Ultra-precision stage(초정밀 스테이지), Flexure hinge(탄성 힌지), Piezoelectric actuator(압전소자 구동기), Fuzzy rule(퍼지규칙), PID controller(PID 제어기)

## 1. 서론

최근 들어 Nano 기술, 정보 기술, 생명과학분야로 세계의 관심이 집중되고 있다. 그 중 Nano 기술은 여러 분야에 적용되고 있으며, 이는 정밀공학에서 중요한 위치를 차지하고 있다. 특히 제품의 소형화, 경량화, 정확화에 대한 요구에 부응하기 위해 미세부분의 고정밀도 작업에 대한 필요성은 더욱 더 커지고 있다. 이를 위해서는 초정밀 위치 결정이 가능한

장치가 필요하게 되었고, 대표적으로 압전소자(piezo)가 이용되고 있다. 압전소자를 이용한 압전 구동기는 압전 특성을 가지는 물질에 전압을 가할 때 기계적인 변형을 발생시키는 원리를 이용한 것으로, 소형이며 높은 동적응답특성과 나노미터에 이르는 분해능을 쉽게 얻을 수 있는 장점이 있다. 이런 이유로 압전 구동기는 초정밀 가공기의 공구 미세조정기, 반도체 리소그라피(lithography) 공정용 초정밀 테이블의 구동기, 전자현미경(AFM, STM)과 같은 초정밀 장비에 많

\* LG전자 RMC사업부 생산기술그룹  
<sup>+</sup> 교신전자, 충북대학교 기계공학부 (jeong@chungbuk.ac.kr)  
주소: 361-763 충북 청주시 흥덕구 개신동 12번지

이 활용되고 있다<sup>(1)</sup>.

압전소자 구동기를 사용할 때 압전소자의 비선형성의 보정과 빠른 응답특성을 얻기 위해 많은 연구가 진행 중이다. Ping Ge<sup>(2)</sup>는 프라이자흐 모델(Preisach model)을 이용하여 압전소자의 비선형특성에 의한 응답을 예측하여 제어에 응용하였다. 또한, Newcomb<sup>(3)</sup>는 압전소자의 향상된 응답특성을 위하여, 기존의 고전압 구동기 대신에 전하 구동기를 제시하였으며, Li<sup>(4)</sup>는 학습 보정기를 이용하여 추종특성을 향상하였다. Jung<sup>(5)</sup>는 간략화된 비선형모델을 이용한 피드포워드 제어를 하였고, 참고문헌 6에서는 역 히스테리시스 모델을 이용하여 정밀도를 향상시켰다. 특히, Park<sup>(7,8)</sup>은 PID 및 강인제어기 설계를 통해 보다 빠른 응답특성을 구현하였다.

본 논문에서는 복잡한 시스템 모델을 이용하지 않고 직관적으로 제어 규칙을 생성할 수 있는 퍼지 제어기법을 적용하였다. PZT를 이용한 개회로 제어 실험의 응답을 이용하여 퍼지규칙을 생성하였으며, 나노미터 정밀도를 측정할 수 있는 실험용 스테이지를 사용하여 실험을 수행하였다. 실험 결과를 PID제어기를 적용하였을 경우와 비교한 결과 우수한 성능이 얻어졌다.

## 2. 초정밀 스테이지의 퍼지 제어기 개발

서론에서 언급한 바와 같이 PZT는 히스테리시스 또는 크립 현상과 같은 비선형적인 요소가 있다. 이들은 구동 거리가 마이크로미터 이상의 큰 거리일 때는 영향이 미미하나, 나노미터 정밀도를 요구할 때는 매우 그 영향이 크다. 따라서 많은 연구자들이 그와 같은 비선형성을 수학적으로 모델링하여 제어하고자 하였다. 그러나 Fig. 1에서 보는 바와 같이 히스테리시스는 나노미터 수준에서 보면 일관성이 매우

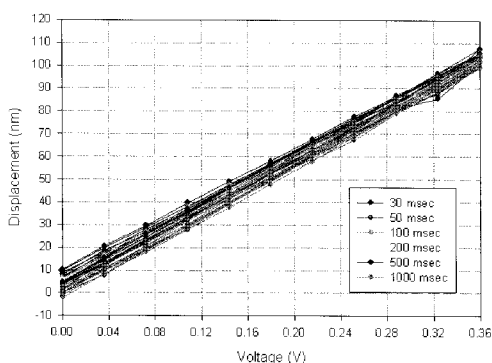


Fig. 1 Hysteresis of a PZT actuator<sup>(9)</sup>

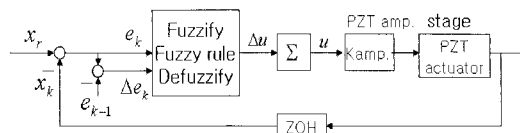


Fig. 2 Block diagram of fuzzy controller

없으며, 크립 또한 경과시간에 따라 변화가 다양하다. 따라서 이들을 수학적으로 모델링하는 것은 부적절하다. 따라서 본 논문에서는 인간의 지능적인 판단력을 이용하는 지능제어의 일종인 퍼지제어기법을 적용한다. 이러한 퍼지이론을 적용하기 위해서는 퍼지화(Fuzzify)를 통해 위치 오차와 위치 오차 변화량을 소속도를 부여한 퍼지집합으로 변환한다. 이를 이용하여 제어기 설계자의 직관과 경험에 입각한 언어적 제어 규칙을 만들고 이를 퍼지 추론에 의하여 PZT의 퍼지 입력전압 변화량을 생성한다. 이를 비퍼지화 과정을 거쳐 PZT 입력변화량을 결정한다. 이과정은 전체적으로 Fig. 2와 같다. 여기에서  $x_r$ 은 위치 명령값이고,  $x_k$ 는 샘플링된 현재 위치값이다. 따라서 오차 및 오차 변화량은 다음과 같다.

$$e_k = x_r - x_k \quad (1)$$

$$\Delta e_k = e_k - e_{k-1} \quad (2)$$

### 2.1 퍼지화(Fuzzify)

언어적 퍼지 제어 규칙을 만들기 위하여 앞에서 언급한 위치 오차와 위치 오차 변화량을 퍼지집합으로 변환한다. 이를 위하여 소속도 함수(Membership function)를 Fig. 3과 같이 정의한다<sup>(10)</sup>. 소속도함수는 일반적으로 많이 사용되는 사다리꼴 함수를 사용하였으며, 언어적 변수는 7개를 Table 1과 같이 정의하였다. 이에 해당하는 소속도함수의 중심값은 Table 2와 같다. 소속도 함수의 아랫변의 크기는 0.2이고, 윗변의 크기는 0.1이다. 그림에서  $\mu(e)$ 는 퍼지화된 오차의 소속도이며,  $\mu(\Delta e)$ 는 퍼지화된 오차 변화량의 소속도이다.

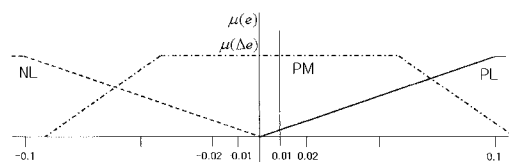


Fig. 3 Membership functions(in part)

**Table 1 Definition of linguistic variables**

	Linguistic Variable	Meaning
1	PL	Positive Large
2	PM	Positive Medium
3	PS	Positive Small
4	Z	Approximately Zero
5	NS	Negative Small
6	NM	Negative Medium
7	NL	Negative Large

**Table 2 Center of membership function**

	Linguistic value						
	NL	NM	NS	Z	PS	PM	PL
Xc	-0.1	-0.01	-0.001	0	0.001	0.01	0.1

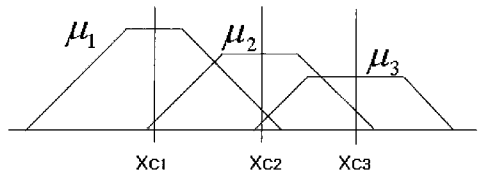
**Table 3 Fuzzy control rule**

		$\Delta e$						
		NL	NM	NS	Z	PS	PM	PL
e	PL	PL	PL	PL	PL	PL	PL	PL
	PM	PM	PM	PM	PM	PM	PM	PM
	PS	NL	NM	NS	PS	PS	PM	PL
	Z	NL	NM	NS	Z	PS	PM	PL
	NS	PL	PM	PS	NS	NS	NM	NL
	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM
	NL	NL	NL	NL	NL	NL	NL	NL

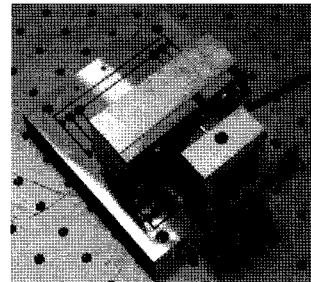
**2.2 퍼지 제어 규칙**

언어적 퍼지 제어 규칙은 많은 실험과 경험을 바탕으로 결정하였으며, Table 3과 같이 표현된다. Table 3에 나타난 Rule 1에서, Rule 49까지의 규칙을 따라서 위치오차와 위치 오차 변화량이 주어지면, 퍼지 추론 방법으로 많이 사용되는 맘다니의 최대-최소 방법을 사용하여 Fig. 4와 같은 퍼지 제어입력 변화량을 구한다. 이를 식 (3)과 같은 무게중심법을 사용하여 비퍼지화하여 제어입력 변화량을 구한다.

$$\Delta u = \frac{\sum_{r=1}^n X_{cl} * \mu_r}{\sum_{r=1}^n \mu_r} \quad (3)$$



**Fig. 4 Defuzzification of control input increments  $\Delta u$  (Center of Area method)**



**Fig. 5 Overview of the experimental ultra-precision stage<sup>(7)</sup>**

**Table 4 Specifications of the system**

Category	Item	Data
Stage	Material	AL 6061-T6
	Density	2700kg/m <sup>3</sup>
	Young's Modulus	68.9GPa
PZT actuator	Maker Model	SONOX P53
	Dimension	5 × 5 × 5(mm)
	Compliance	22.9 × 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /N
	Stiffness	15.2 × 10 <sup>10</sup> m <sup>2</sup> /N
	Density	7830kg/m <sup>3</sup>
Linear Encoder	Model	LIP382
	Measuring standard	DIADUR phase grating
	Output signals	Sine wave, 1 V <sub>PP</sub>
	Signal periods	0.128μm
	Accuracy grades	± 0.5μm
	Recommended measuring steps	0.001μm

### 3. 퍼지 제어 실험 및 결과

#### 3.1 시스템 구성

Fig. 5는 실험에 사용된 초정밀 스테이지를 보여주고 있다. 스테이지는 굴절현지에 의하여 지지되고 있으며, 스테이지의 위치는 초정밀 리니어 엔코더에 의하여 측정되고 있다. Table 4에 설계된 초정밀 스테이지의 기본 사양을 정리하였다.

초정밀 리니어 엔코더로부터 나온 신호는 카운터 보드를 통하여 2msec의 샘플링 시간으로 제어기인 컴퓨터로 입력된다. 이 피드백 변위 정보를 이용하여 퍼지 제어기는 제어 입력 변화량  $\Delta u$ 를 만들고, 이는 다시 누적되어 제어 입력  $u$ 가 되며, 이 값은 12 비트 D/A 변환기를 통해 0V에서 10V의 아날로그 값으로 출력되며 이 값은 PZT 증폭기에 전달된다. 전달된 값은 0V에서 150V의 전압으로 증폭되어 스테이지에 설치된 압전소자 구동기를 구동한다.

#### 3.2 실험 결과

최적화된 퍼지제어규칙표(fuzzy control rule table)을 이용하여 설계된 퍼지 제어기의 성능을 확인하기 위해 PID 제어기를 사용한 경우와 퍼지 제어기를 사용한 경우의 계단입력(step input) 응답특성과 연속 계단입력 응답특성 및 동적 위치성능추종 결과를 비교하였다.

PID제어의 일반적인 식은 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4)$$

여기서,  $K_p$ 는 비례게인(Proportional Gain),  $K_i$ 는 적분게인(Integral Gain),  $K_d$ 는 미분게인(Differential Gain)을 나타낸다.

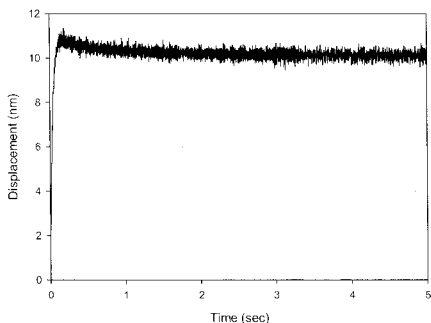
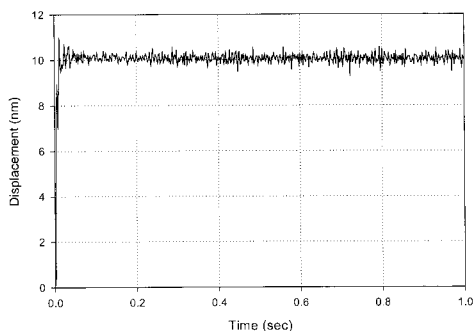


Fig. 6 Step response of the PID controller

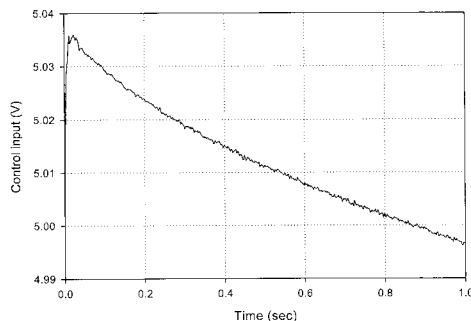
실험에 사용된 PID제어기 게인 값은, 많은 실험에 의하여 가장 우수한 성능일 때의 것들로서  $K_p = 0.02$  (V/nm),  $K_i = 1 \cdot 10^8$  (V/(nm·sec)),  $K_d = 500$  (V·sec/nm)를 사용하였다.

Fig. 6에서 보는 바와 같이 정착시간이 약 0.4초로서 상당히 느린 것을 알 수 있다. 더욱이 PID 제어 게인을 선정하는 매우 어려운 일이다. 따라서 본 논문에서 제안한 퍼지제어를 적용했을 경우의 실험결과를 다음 Fig. 7~10에 보였다. 위치 명령 5nm step입력에 대한 응답은 Fig. 7과 같다. 상승시간은 0.01sec, 과도응답(overshoot)은 0.012sec에서 약 1nm가 발생되었으며, 정착시간은 0.02sec으로 매우 빠른 응답 특성을 가진다. 연속적인 step입력에 대해서 fuzzy제어기의 응답특성을 검증하기 위해, Fig. 8은 0nm에서 50nm까지 5nm 간격으로 연속 step 입력 실험을 수행한 결과이며, 최대진동범위는  $\pm 0.5$ nm정도로, 본 fuzzy제어기는 5nm이하의 분해능을 충분히 만족하고 PID제어기에 비해 매우 빠른 응답특성을 보임을 실험적으로 검증하였다.

퍼지제어기에서 시스템의 동적인 위치 추종 성능을 검증



(a) step response



(b) control input

Fig. 7 Step response for 10nm reference using the fuzzy controller

하기 위해 기준 위치로 사인(sine)함수를 이용하여 주파수를 1Hz에서 5Hz까지 1Hz간격으로 실험을 실시하였다. Fig. 9 (a)-(b)에서 보듯이 퍼지 제어를 사용할 경우 5Hz까지 약

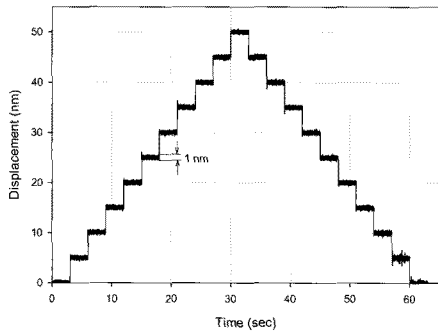
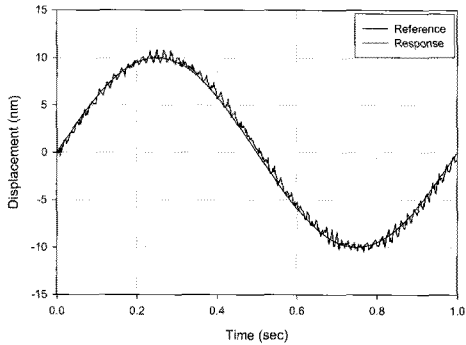
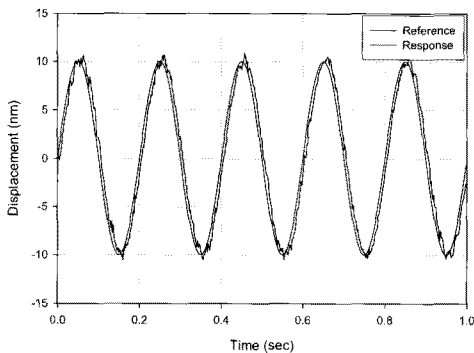


Fig. 8 Continuous step response for 5nm reference using the fuzzy controller



(a) 1Hz response



(b) 5Hz response

Fig. 9 Comparison of response and reference results of fuzzy controller

10%의 위치오차가 발생되고 있다.

1Hz에서 20Hz까지 주파수증가에 따른 크기(dB)와 위상차를 Fig. 10에 표기하였다. 주파수가 증가됨에 따라 위치명령과 실험결과 간의 크기(dB)는 점점 크게 차이가 남을 알 수 있다. 그리고 1.5~2.5° 범위 내에서 위상 차이를 보이지만, 주파수 증가에 대해서 큰 변화 없이 응답함을 알 수 있다. 각각의 크기(dB)와 위상차는 식 (5)와 (6)과 같다.

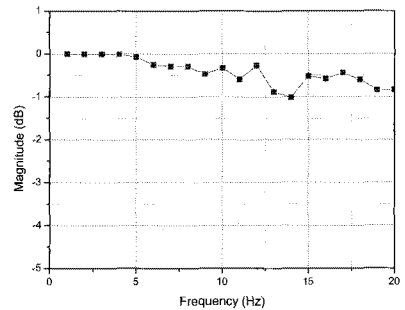
$$M_g(dB) = 20 \times \log \frac{c(t)}{r(t)} \quad (5)$$

$$\angle \Phi = (\angle r(t) - \angle c(t)) \quad (6)$$

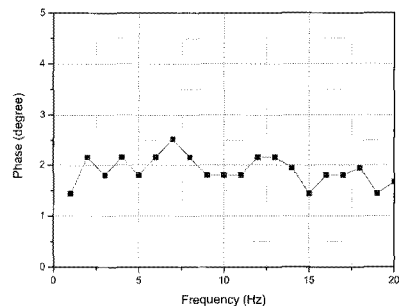
여기서,  $c(t)$ 는 실험결과,  $r(t)$ 는 명령입력값을 나타낸다.

### 3.3 결과 요약

앞에서 설명한 실험결과들을 종합하여 Table 5에 비교하였다. 본 실험에서는 퍼지 제어가 응답특성 및 동적 위치 추종 성능 등에 있어 PID제어기보다 상대적으로 우수하다는 것을 알 수 있다.



(a) Magnitude (dB)



(b) Phase

Fig. 10 Magnitude (dB) and phase difference of the experimental response with frequency variation

**Table 5 Results of the fuzzy controller and PID controller**

		Fuzzy controller	PID controller
10nm step input	rising time	0.01sec	0.09sec
	peak time	0.012sec	0.208sec
	overshoot	1nm	1nm
	settling time	0.03sec	1.5sec
continuous step input	rising time	0.01sec	0.09sec
	max oscillation range	±0.5nm	±1.5nm
dynamic tracking performance	1Hz	1nm error(10%)	1nm error(10%)
	5Hz	1nm error(10%)	2.5nm error(25%)

#### 4. 결론

본 실험에서는 PID제어기 및 퍼지 제어기에 대해 계단입력에 대한 성능 실험과 연속 계단 입력 실험을 통한 분해능 검증 실험을 수행하였다. 그리고 사인파 함수의 주파수 변화로부터 동적인 위치 추종 성능을 검증하는 실험을 수행하였고, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) 본 연구에서 적용한 PID제어기는 step입력에 대한 정착시간(0.4sec)에 있어서 만족할 만한 성능을 나타내지 못하였다.
- (2) 퍼지 제어기는 상승시간이 0.01sec이고, 정착시간은 0.03sec로 빠르게 안정됨을 확인하였다.
- (3) 퍼지 제어기는 5nm step 연속입력에 대한 최대진동범위는 1nm이므로 5nm이하의 분해능을 만족한다.
- (4) 퍼지 제어기와 PID제어기를 비교하면 퍼지제어기가 정착시간은 10배가량 빠르며 분해능이 매우 우수함을 확인하였다.
- (5) 동적위치추종성능에 있어서 퍼지제어기를 사용할 경우 20Hz의 명령일 때 까지 1nm 이내의 오차를 보인다.

#### 후 기

이 논문은 2007년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비지원에 의하여 연구되었음(This work was supported by the research grant of the Chungbuk National University in 2007).

#### 참 고 문 헌

- (1) Jeong, S. H., Kim, G. H., Cha, K. R., Lee, K. H., and Song, S., 2006, "A Study on the Motion Mechanism of Multi-Axis Ultra Precision Stage for Optical Element Alignment," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 15, No. 1, pp. 8~16.
- (2) Ge, P. and Jouaneh, M., 1996, "Tracking Control of a Piezoceramic Actuator," *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, Vol. 4, No. 3, pp. 209~216.
- (3) Newcomb, C. and Flinn, I., 1985, "Improving the Linearity of Piezoelectric Ceramic Actuators," *Electronics Letters*, Vol. 18, No. 11, pp. 442~443.
- (4) Li, C. J., Beigi, H. S. M., Li, S. and Liang, J., 1993, "Nonlinear Piezo-Actuator Control by Learning Self-Tuning Regulator," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 115, pp. 720~723.
- (5) Jung S. B. and Kim S. W., 1994, "Improvement of scanning accuracy of PZT piezoelectric actuators by feed-forward model reference control," *Precision Engineering*, Vol. 16, No. 1, pp. 49~55.
- (6) Kim, J. Y., Lee, B. R., Yang, S. Y. and Ahn, K. K., 2003, "Precision Position Control of Piezoactuator Using Inverse Hysteresis Model and Neuro-PID Controller," *Journal of Control, Automation and Systems Engineering*, Vol. 9, No. 1, pp. 22~29.
- (7) Park, J. S. and Jeong, K. W., 2006, "A study on the design and control of a ultra-precision stage," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 15, No. 3, pp. 111~119.
- (8) Park, J. S. and Jeong, K. W., 2006, "Robust control for a ultra-precision stage system," *Trans. of KSME A*, Vol. 30, No. 9, pp. 1094~1101.
- (9) Park, J. S., 2008, *Dynamic Characteristic Analysis and Robust Controller Design of an Ultra Precision Stage System*, Ph. D. thesis, Dept. of Mechanical Engineering, Graduate School, Chungbuk National University.
- (10) Harris, C. J., Moore, C. G. and Brown, M., 1993, *Intelligent Control; Aspect of Fuzzy Logic and Neural Nets*, World Scientific.