

압전액추에이터 정밀 위치 제어

윤소남*(한국기계연구원), 김찬용(한국기계연구원), 함영복(한국기계연구원),
조정대(한국기계연구원), 안병규(전북자동차부품산업혁신센터)

Precision position control of piezoelectric actuator

S. Yun(KIMM), C. Y. Kim(KIMM), Y. B. Ham(KIMM), J. Jo(KIMM), B. K. Ahn(JAIRC)

ABSTRACT

The purpose of this paper is to improve the hysteresis characteristics of a stack type piezoelectric actuator using system identification and tracking control. Recently, several printing methods that cost less and are faster than previous semiconductor processes have been developed for the production of electric paper and RFID. The system proposed in this study prints by spraying the molten metal, and consists of a nozzle, heating furnace, operating actuator, and an XYZ 3-axis stage. As an operating system, the piezoelectric(PZT) method has very valuable uses. However, the PZT actuator has a very big hysteresis characteristic due to the ferroelectric characteristics of the PZT element. This causes problems in the system position control characteristics and deteriorates the performance of the system. In this study, an investigation was conducted to improve the hysteresis characteristics of the PZT actuator that has an output displacement for the input voltage. The study proposed an inverse hysteresis model, a mathematic modeling method that can express the geometric relationship between voltage and displacement, in order to reduce the hysteresis of the PZT actuator. In addition, system identification and PID control methods were examined. Also, it was confirmed that the proposed control strategy gives good precision position control performance.

Key Words : Piezoelectric actuator (압전액추에이터), Prediction Error estimate (추정오차법), Metal jet system (메탈젯 시스템), Inverse hysteresis (역히스테리시스), System identification (시스템동정)

1. 서론

급속도로 발전하고 있는 반도체, 전자통신, 우주항공 분야에서 초박막 소재 및 서브마이크로의 정밀도를 갖는 시스템 사용이 증가함에 따라 초정밀 액추에이터에 대한 요구가 확대되고 있으며, Electric paper 및 RFID 제작에 있어 기존의 반도체 공정보다 저가격이면서 빠르게 할 수 있는 프린팅 기법들이 개발되면서 마이크로 액추에이터의 최적제어에 대한 연구 또한 활발히 진행되고 있는 추세이다^{1,2}.

본 연구에서 대상으로 하는 시스템은 용융된 메탈을 직접 분사하여 프린팅 하는 것으로 크게 노즐, 가열로, 구동액추에이터, XYZ 3축 스테이지로 구성되어 있으며, 구동 액추에이터로서 압전 방식이 매우 유용하게 쓰이고 있다. 그런데 압전액추에이터는 압전소자가 갖는 강유전체 고유의 특성으로 인하여

매우 큰 히스테리시스 특성을 가지며, 이로 인하여 시스템의 정밀한 위치제어 특성에 문제가 발생하고, 더 나아가서는 마이크로 및 나노프린팅 효율 저하를 유발시키는 원인으로 작용하고 있어 히스테리시스 성능을 개선시키는 연구의 필요성이 제기되고 있다^{3,4,5}.

본 연구는 압전액추에이터가 가지는 비선형성인 히스테리시스 성능을 개선하여 시스템의 추적성능 및 정밀한 위치제어를 가능하게 하는데 목적이 있다. 압전액추에이터의 비선형성을 개선하기 위하여 여러 가지 제어기법들을 사용하였으며, 우선적으로 압전액추에이터에 인가되는 입력 전압과 출력 변위 사이의 큰 비선형성은 피드백 제어(Feedback control)를 통해 해결을 하고 있지만 진동 제어와 같이 신속한 구동이 필요한 경우 피드백 제어는 시간 지연 등의 문제를 안고 있기 때문에 앞먹임 제어

(Feedforward control) 등으로 동적인 구동에 있어서의 빠른 응답성과 선형성을 보상하는 것에 효과적이다. 또한, 변위를 일으키는 제어 입력으로 전압 대신에 전하(Charge)를 이용한다면 압전구동기의 비선형 특성을 없애고 선형적으로 제어할 수 있으나 이 방법은 전압대신 전하를 제어입력으로 이용하기 위해서는 특별히 고안된 전하구동증폭기(Charge drive amplifier)와 같이 하드웨어적인 요구사항이 많아지게 되고 이로 인하여 변위감도가 떨어지는 단점이 있어 이를 보완하기 위하여 전하피드백방법이 아닌 전압피드백방법을 사용하였다. 마지막으로 PID 제어 및 역히스테리시스 모델링 기법을 사용하였다. PID 제어에서는 제어 게인값을 구하기 위해 고전적 방법인 Ziegler-Nichols 기법을 사용하였다. 그러나, 제어성능이 우수하지 못하여 시스템동정(System Identification) 기법인 PEM(Prediction Error estimate method)⁷을 이용하여 시스템의 전달함수를 구하여 이 전달함수를 가지고 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하여 최적의 PID 제어 게인값을 구하였다. 기존의 전압과 변위사이의 기하학적 표현을 근사화한 히스테리시스 모델링 기법에서 히스테리시스 특성을 개선하기 위하여, 히스테리시스가 발생한 변위만큼 역으로 그 입력전압을 구할 수 있는 역히스테리시스 기법을 제안하였다⁶. 압전액추에이터에 등간격으로 전압을 줄여서 입력전압을 인가하면 반전점(Turning point)부근에서 각기 다른 간격의 히스테리시스 특성을 볼 수 있는데, 이 부분에서의 성능향상을 위한 보상기 설계연구가 수행되었다.

2. 히스테리시스 특성개선을 위한 제어알고리즘

2.1 제어기구성

Fig. 1은 정밀한 위치제어가 요구되는 적층형 압전액추에이터가 내장된 메탈젯 프린팅 시스템을 나타낸다. 용융된 메탈을 압전액추에이터가 제어하는 노즐을 통하여 분사시키는 것으로써 액추에이터로 사용되는 적층형 압전액추에이터는 속응성과 더불어 재현성이 매우 중요하게 거론된다. 여기에서, 재현성과 관련된 히스테리시스 특성연구는 메탈 프린팅 성능을 향상시키는 중요한 연구과제 중의 하나이다. 본 논문에서는 압전액추에이터에 전압을 인가하여 출력변위를 측정하여 히스테리시스 특성을 향상시키는 연구를 수행하였다. Fig. 2는 압전액추에이터가 가지는 히스테리시스 특성을 개선하기 위한 실험장치 개략도를 나타내고 있다. Fig. 3은 본 연구에 사용된 제어기의 블록다이어그램을 나타낸다. 여기에 사용된 제어기법으로는 히스테리시스의 변위를 전압으로 추정하는 역히스테리시스(Inverse

hysteresis) 모델링기법과 빠른 시스템응답을 보상하는 앞먹임(Feedforward) 제어기법 및 PID제어기법을 병행하여 히스테리시스 특성을 개선하는 연구를 수행하였다. 또한, 컴퓨터시뮬레이션을 통한 시스템의 최적 제어조건을 구현하기 위하여 시스템동정(System Identification)을 수행하였다. 시스템동정은 연구대상으로 하는 압전액추에이터의 스텝응답실험 데이터로부터 동정방법중의 하나인 PEM동정기법을 사용하여 연구시스템과 가장 유사한 특성을 가지는 전달함수를 구하였다. 빠른 응답성을 보장하기 위하여 앞먹임제어 및 PID제어를 사용하였다.

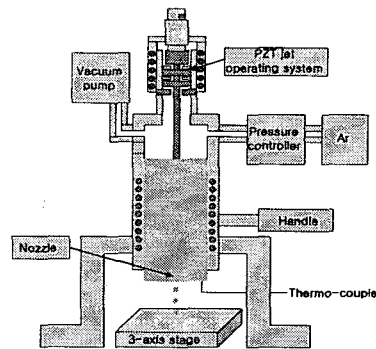


Fig. 1 Metal jet system with a stack type PZT actuator

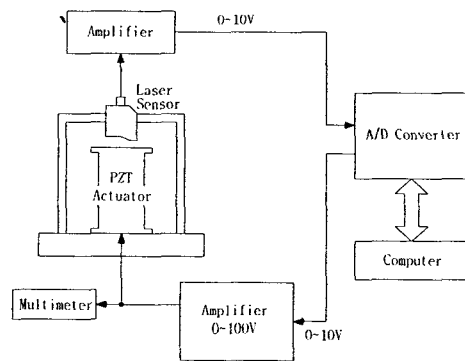


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

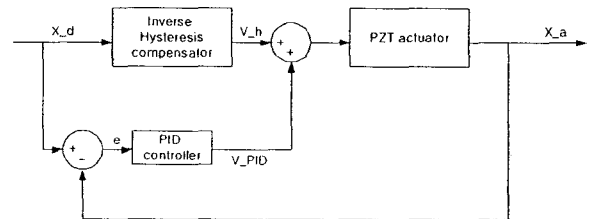


Fig. 3(a) Control block-diagram for PZT actuator position control

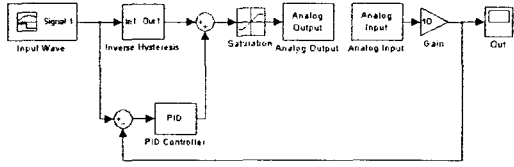


Fig. 3(b) Block-diagram using simulink for PZT actuator position control

2.2 PID제어 및 시스템 동정

시스템의 빠른응답성을 고려하여 앞먹임 제어 및 PID제어를 사용하였다. PID제어를 사용하기 위하여 PID제어 게인값을 구해야 하는데 본 연구에서는 고전적방법인 Ziegler-Nichols기법을 사용하여 제어 게인값을 구하였다. Ziegler-Nichols기법은 주어진 플랜트의 과도응답특성에 기초를 둔 비레이득

K_p , 적분시간 T_i , 미분시간 T_d 의 값을 결정하여 상기 값을 가지고 K_p , K_i , K_d 를 구할 수 있다. 구해진 값은 각각 $K_p=0.7$,

$K_i=60$, $K_d=0.0004$ 이다. 그러나 구해진 게인값을 가지고 실험한 결과 히스테리시스 특성 개선에 좋은 효과를 내지 못하여 다른 방법을 시도하였다. 그 다른 방법이 시스템동정이다. 시스템동정은 시스템의 스텝응답으로 얻어진 실제 데이터를 PEM(Prediction Error estimate Method)을 이용하여 시스템과 가장 유사한 전달함수를 구할 수 있으며, 이 전달함수를 가지고 컴퓨터시뮬레이션을 수행하여 최적의 게인값을 구하였다. 수식(1)은 전달함수 2차 표준식이며, 수식(2)는 동정으로 구해진 5차 전달함수이다. 그리고, 구해진 최적의 게인값은

$K_p=0.1$, $K_i=26$, $K_d=0.0006$ 이다.

Fig 4(a)와 Fig 4(b)는 Ziegler-Nichols기법으로 구해진 제어게인값과 시스템동정을 이용하여 구해진 제어 게인값의 스텝응답 실험결과와 그래프이며, Fig 5는 스텝응답 시뮬레이션결과와 그래프이다. 실험과 시뮬레이션에서 동정으로 구해진 게인값이 고전적방법으로 구해진 게인값 보다 우수함을 볼 수 있다.

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (1)$$

$$G(s) = \frac{a_1 s^4 + a_2 s^3 + a_3 s^2 + a_4 s + a_5}{s^5 + b_1 s^4 + b_2 s^3 + b_3 s^2 + b_4 s + b_5} \quad (2)$$

여기서, 식(1)의 변수는 ($\omega_n=493.651098$, $\xi=0.04098950568$)이며, 식 (2)의 변수는 아래와 같다.

$$a_1 = 314.8852, a_2 = 345465.4532, a_3 = 69678191.5174,$$

$$a_4 = 83693105884, a_5 = -579793475531$$

$$b_1 = 1422.9483, b_2 = -1215701.6722, b_3 = 245192894.4904$$

$$b_4 = -172317153171.267, b_5 = 1106566335141.74$$

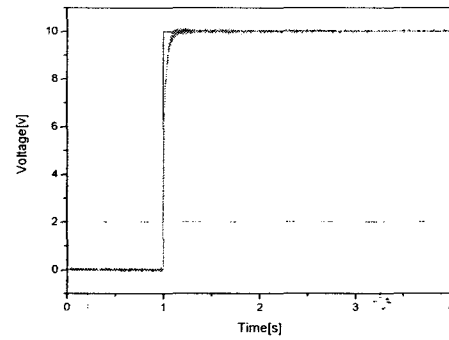


Fig. 4(a) Experimental result of PID gain using Ziegler-Nichols method

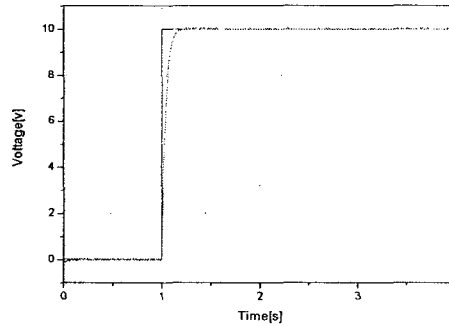


Fig. 4(b) Experimental result of PID gain using system identification method

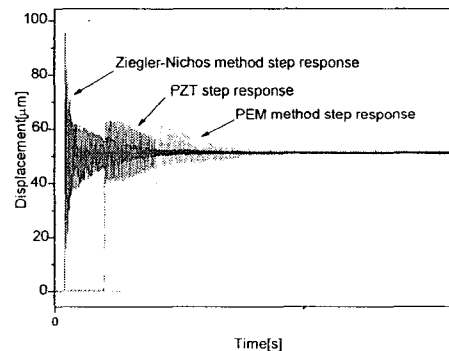


Fig. 5 Step response of the PZT actuator

2.2 역히스테리시스 모델링 기법

기존의 전압과 변위의 기하학적 표현을 근사화한 히스테리시스 모델링 기법에서 히스테리시스 특성을 개선하기 위하여, 히스테리시스가 발생한 변위 만큼 역으로 그 입력전압을 구할 수 있는 역히스테리시스 모델링기법을 이용하여 히스테리시스특성을 개선할 수 있다. 일반적으로 압전액추에이터에 인가전압을 증가시키거나 감소시키면 인가전압에 대한 변위는 비선형적인 히스테리시스 특성을 갖게 된다.

압전액추에이터에 인가전압을 0[V]에서 V_{max} 까지 상승시키면 압전액추에이터는 0[V]에서 최대 변위 e_{max} 까지 증가하게 되고, 전압을 다시 0[V] 까지 하강시키면 좌표(0,0)을 상승 반전점(Turning point)으로 하고, 좌표(V_{max} , e_{max})를 하강 반전점으로 하는 특정한 형상을 가진 비선형 히스테리시스 주 루프(major loop)를 형성한다. 다시 인가전압을 어느 정도 증가시킨 뒤 적절한 하강 반전점을 기점으로 0[V] 까지 하강하는 작업을 반복하면 Fig. 6 과 같은 다중 히스테리시스 루프를 생성하게 된다. 그림에서 보는 바와 같이 다중 히스테리시스의 특징은 주 루프(major loop)안에 다수의 소 루프(minor loop)들이 존재하게 되며, 각 루프들은 하강할 때 각각 다른 기울기를 가지지만 기울기의 형태는 유사한 특징을 가지고 있음을 알 수 있다. 본 곡선은 실험을 통해서 얻어진 결과로 히스테리시스가 14.7[%]로 상당히 큼을 알 수 있으며, 압전액추에이터의 히스테리시스 성능을 향상시키기 위해서는 위에서 말한 역히스테리시스 모델링 기법으로 실험된 모델을 수식화하여 제어초기에 보상할 필요가 있음을 알 수 있다. 곡선의 제일 바깥쪽 곡선을 major loop라하고, 안쪽 곡선을 minor loop라 한다. minor loop의 모델은 실험데이터에서 상승데이터와 하강데이터를 나누어 각각의 다항식으로 선형보간(Linearization)할 수 있으며, 그 값을 H^{-1}_{UP} ,

H^{-1}_{down} 으로 나타낼 수 있다. 보간한 식을 사용하여 major loop의 인가전압과 변위사이의 관계를 수학적으로 구하고, minor loop의 모델은 바깥쪽의 major loop수식의 반전점을 기준으로 하여 평행이동시킨 수식을 적용시켜 역히스테리시스 모델을 만들 수 있다. 식(3),(4)는 역히스테리시스 모델을 이용한 제어전압을 나타내며, 식(5),(6)은 상승 및 하강 때의 보간식을 나타낸다.

$$V_{UP} = V_a + H^{-1}_{UP}(e - e_a) \quad (3)$$

$$V_{down} = V_b - V_{max} + H^{-1}_{down}(e_{max} - e_b + e) \quad (4)$$

$$H^{-1}_{up} = \frac{1}{-0.0113 s^2 + 1.0692 s + 0.2203} \quad (5)$$

$$H^{-1}_{down} = \frac{1}{0.0018s^3 + 0.0107s^2 + 0.7289s - 0.5033} \quad (6)$$

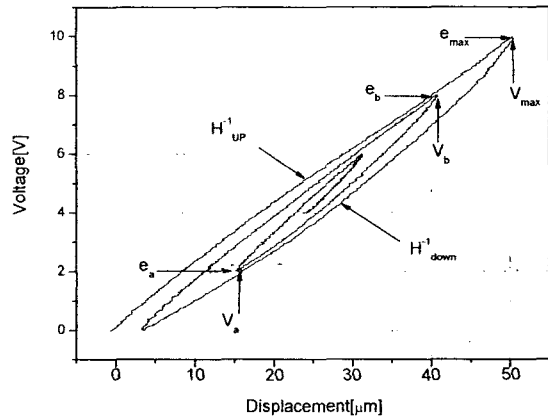


Fig. 6 Hysteresis nonlinearity of the PZT actuator

3. 실험 및 결과

Fig. 7은 본 실험에 사용된 장치의 구성을 나타내며, Table. 1은 실험에 사용된 장비의 목록을 나타낸다. 실험에서 AD/DA converter 샘플링 속도는 1kHz로 이루어 졌다.

본 실험은 먼저 아무런 제어기가 없는 상태에서 압전액추에이터의 히스테리시스 성능실험을 하였으며, 두 번째로는 PID제어기를 사용한 상태에서의 히스테리시스 성능실험을 하였고, 마지막으로 PID제어기+역히스테리시스 모델링 기법을 사용한 상태에서의 히스테리시스 성능실험을 하였다. 각각의 히스테리시스 특성은 Table. 2에서 알 수 있다.

Table. 1 Equipment list for the experiment

품 명	용 도	제 작 사
ASB680C801*P0	압전액추에이터	Tokin
LVPZT E505	압전소자 증폭기	PI
LC2430	변위센서	Keyence
LC2400C	변위계	Keyence
NI6062E	D/A&A/D	NI

Table. 2 Hysteresis results

제어기법	히스테리시스[%]
무제어상태	14.7[%]
PID	3.118[%]
PID+역히스테리시스	0.77[%]

Fig. 8은 무제어상태에서의 히스테리시스 특성곡선과 PID제어기만을 사용했을 때의 히스테리시스 특성곡선을 나타내며, Fig. 9은 PID+역히스테리시스 모델링기법을 사용했을 때의 히스테리시스 특성곡선을 나타낸다. 각각의 실험으로 구해진 히스테리시스 특성곡선을 비교하면 본 연구에서 사용한 제어기가 히스테리시스 특성을 많이 개선했음을 알 수 있다. 또한, 히스테리시스의 감소로 인해 압전액추에이터의 제어응답이 빠름을 알 수 있다. 따라서, 제어기가 얼마만큼 빠른 응답으로 시스템을 추종할 수 있는가를 알아보기 위한 시스템 추종성능실험을 수행하였다. 그 결과, 삼각파나, 정현파를 입력하였을 때 압전액추에이터가 입력파형을 우수하게 추종함을 알 수 있다. Fig. 10와 Fig. 11은 삼각파와 정현파 입력일 때 압전액추에이터의 추종실험 결과이다.

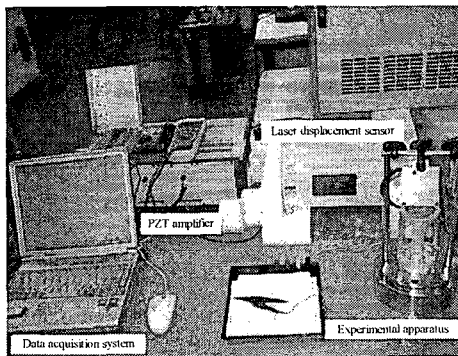


Fig. 7 Photo view of experimental apparatus

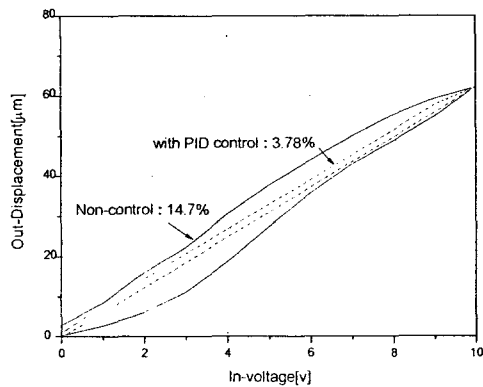


Fig. 8 Hysteresis characteristics

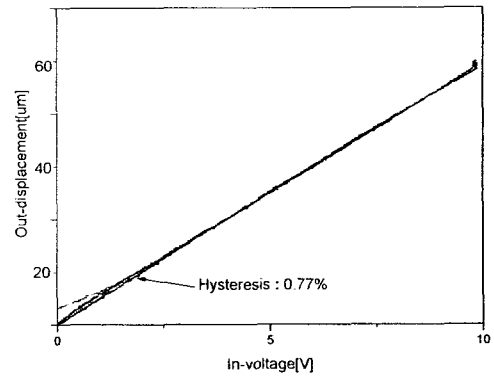


Fig. 9 Result of inverse hysteresis model compensating & PID control

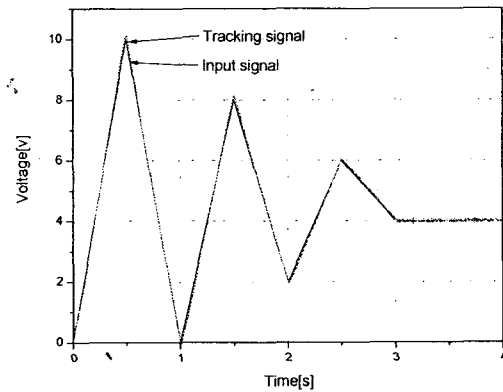


Fig. 10 Lamp response characteristics

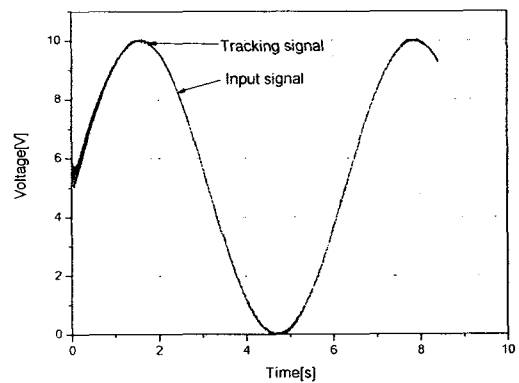


Fig. 11 Sine response characteristics

4. 결론

본 연구는 적층형 압전액추에이터가 가지는 히스테리시스 특성을 개선하여 정밀 위치제어에 사용하기 위한 것으로써, 여러 가지 제어기법을 사용하

었다. 첫째로 빠른 응답성에 대응하기 위하여 앞먹임(Feedforward)제어기법 및 PID제어기법을 제안하였으며, 둘째로 히스테리시스의 변위만큼 역으로 전압을 찾아내는 역히스테리시스 모델링기법을 제안하였다. 그 중에서 PID제어기를 사용하기 위해서는

K_p , K_i , K_d 의 게인값이 필요하며, 이 값들을 구하기 위해서 기존의 Ziegler-Nichols을 사용하였으나, 제어기의 성능이 우수하지 못하여 게인값들을 찾는데 다른 방법을 제안하였다. 그 방법은 PEM동정기법을 이용하는 방법으로써, 실제시스템의 스텝 응답 데이터를 이용하여 실제시스템과 가장 유사한 모델을 전달함수로 찾아내는 것이며, 이 전달함수를 컴퓨터시뮬레이션을 수행하여 최적의 PID게인값을 구하였다. 그 결과, 본 연구에서 수행한 PID제어기법+역히스테리시스 모델링기법이 무제어 일 때의 히스테리시스와 비교하면 14.767[%]에서 0.77[%]로 히스테리시스가 상당히 감소함을 실험을 통하여 확인하였다. 따라서, 본 연구는 MEMS분야에 널리 사용되는 압전액추에이터의 정밀 위치 제어 및 추정 제어에서 가장 크게 부각될 수 있는 히스테리시스 특성을 개선하는데 크게 이바지 할 것으로 기대된다.

참고문헌

1. K. Yamaguchi, K. Sakai, T. Hirayama, T. Yamanaka, "Generation of Three-dimensional Structure Using Metal Jet", Journal of JSPE, Vol. 64, No. 10, pp. 1497~1501, 1998.
2. K. Yamaguchi, K. Sakai, T. Yamanaka, "Generation of Three-dimensional Micro Structures Using Metal Jet-Bonding Strength Between Metal Drops", Journal of JSPE, Vol. 65, No. 11, pp. 1639~1644, 1999.
3. Michael Goldfarb and Nikola Celanovic, June "Modeling Piezoelectric Stack Actuators for Control of Micromanipulation", IEEE control systems, 1997.
4. Timothy Chang and Xuemei Sun, "Analysis and Control of Monolithic Piezoelectric Nano-Actuator", IEEE Transactions on control systems technology, vol. 9, No.1, Jan. 2002.
5. P. Ge and M. Jouaneh, "Tracking Control of

a Piezoceramic Actuator", IEEE transactions on control systems technology, Vol. 4, No. 3, 1996.

6. N. C. Boydston, "Thermally actuated microbeam for large in plane mechanical deflections", J. Vac. Sci. Technol. A, Vol. 17, No. 4, pp.2257-2263, Jul/Aug. 1999.
7. Bahram Shahian and Michael Hassul, "Control System Design Using Matlab", Prentice-Hall International Inc., 1993.