

메탈 프린팅용 압전액추에이터의 특성개선 Characteristics Improvement of a PZT Actuator for Metal Printing

윤소남 · 함영복 · 김찬용 · 박평원 · 강정호

S. N. Yun, Y. B. Ham, C. Y. Kim, P. Y. Park and J. H. Kang

Key Words : PZT actuator(압전 액추에이터), Identification(계수분석), Ziegler Nichols(지글러 니콜스), Inverse hysteresis(역히스테리시스)

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 are cost less and faster than previous semiconductor processes have been developed for the production of electric paper and RFID(Radio Frequency IDentification). The system proposed in this study prints by spraying the molten metal. And this system consist of a nozzle, heating furnace, operating actuator and an XYZ 3-axis stage. As an operating system, the piezoelectric(PZT) actuator is a very useful tool for position control of the metal printing system. However, the PZT actuator has a hysteresis nonlinearity due to the ferroelectric characteristics of the PZT element. This hysteresis causes problem position control characteristics in the system 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. In order to reduce the hysteresis nonlinearity of the PZT actuator, this proposed a inverse hysteresis model and a mathematic modeling method that can express the geometric relationship between voltage and displacement. In addition, system identification and PID control methods were examined. Also, it was confirmed that the proposed control strategy gives good tracking performance.

1. 서 론

급속도로 발전하고 있는 반도체, 전자통신, 우주항공 분야에서 초박막 소재 및 서브마이크로의 정밀도를 갖는 시스템 사용이 증가함에 따라 초정밀 액추에이터에 대한 요구가 확대되고 있으며, 전자종이(Electric paper) 및 RFID(Radio Frequency IDentification) 제작에 있어 기존의 반도체 공정보다 저가적이면서 빠르게 할 수 있는 프린팅 기법들이 개발되면서 마이크로 액추에이터의 최적제어에 대한 연구 또한 활발히 진행되고 있는 추세이다. 따라서 일반적으로 사용되고 있는 상온에서 액체상태의 물질을 이용하는 프린트가 아닌 녹여진 금속을 분사는 프린팅 기법에서는 더욱더 정밀한 액추

에이터의 제어기술이 요구 되어진다^{1,2)}.

이 연구에서 대상으로 하는 시스템은 용융된 메탈을 직접 분사하여 프린팅 하는 것으로 크게 노즐, 가열로, 구동액추에이터, XYZ 3축 스테이지로 구성되어 있다. 이 중에서도 프린터의 가장핵심이 되는 노즐을 제어하는 구동액추에이터로서 저 소비 전력인 압전소자를 이용하는 압전 방식이 매우 유용하게 쓰이고 있다. 그런데 압전액추에이터는 압전소자가 갖는 강유전체 고유의 특성으로 인하여 매우 큰 히스테리시스 특성을 가지며³⁾, 이로 인하여 시스템의 정밀한 위치제어 특성에 문제가 발생하고, 더 나아가서는 마이크로 및 나노 프린팅 효율 저하를 유발시키는 원인으로 작용하고 있어 히스테리시스 성능을 개선시키는 연구의 필요성이 제기되고 있다⁴⁾. 따라서, 압전 액추에이터의 정밀한 제어를 위해서는 압전소자가 가지는 히스테리시스를 줄이는 제어알고리즘과 히스테리시스가 발생하는 환경적 요인도 파악할 필요가 있다⁵⁾.

이 연구는 압전액추에이터가 가지는 비선형성인

접수일 : 2005년 4월 12일

윤소남(책임저자) : 한국기계연구원 지능형정밀기계연구본부
E-mail : ysn688@kimm.re.kr Tel. 042-868-7155

함영복, 김찬용, 박평원 : 한국기계연구원 지능형정밀기계연구본부

강정호 : 삼성종합기술원 나노공정센터 책임연구원

히스테리시스 성능을 개선하기 위한 것으로 여러 가지 제어기법을 사용하였다. 하드웨어적인 요구사항이 많고 이로 인해 변위감도가 떨어지는 단점을 보완하기 위하여 전하피드백방법이 아닌 전압피드백방법을 사용 하였으며, 그에 따른 빠른 응답을 보상을 하기 위하여 앞먹임(Feedforward)제어기법과 PID제어기법을 사용하였다. PID제어기법에 있어서 제어기에 사용되는 게인값을 구하기 위해 고전적방법인 Ziegler-Nichols 방법을 사용하여 게인값을 구하였으나, 그 성능이 우수하지 못해 성능을 개선하기 위하여 시스템계수분석을 수행하였다. 시스템계수분석은 압전액추에이터의 스텝응답실험 데이터를 가지고 PEM계수분석기법을 사용하였다. 그 결과 실험대상 압전액추에이터와 가장 유사한 특성을 가지는 전달함수를 구하였으며, 구해진 전달함수를 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 컴퓨터시뮬레이션 결과로부터 적절하고 성능이 우수한 PID게인값을 구하였다. 마지막으로 기존의 전압과 변위사이의 기하학적 표현을 근사화한 히스테리시스 모델링 기법에서 히스테리시스 특성을 개선하기 위하여, 히스테리시스가 발생한 변위만큼 역으로 그 입력전압을 구할 수 있는 역히스테리시스 기법을 제안하였다. 압전액추에이터에 등간격으로 전압을 줄여서 입력전압을 인가하면 반전점(Turning point)부근에서 각기 다른 간격의 히스테리시스 특성을 볼 수 있는데, 이 부분에서의 성능 향상을 위한 보상기 설계연구가 수행되었다.

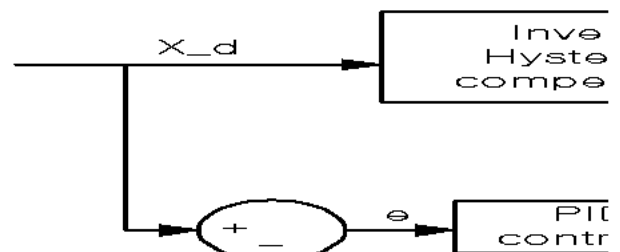
2. 압전액추에이터의 특성

2.1 제어기의 구성

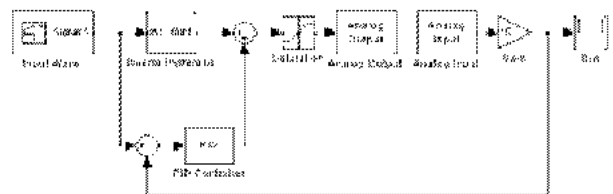
Fig. 1은 이 연구의 대상으로 하는 적층형 압전액추에이터가 내장된 메탈젯 프린팅 시스템을 보이고 있다. 용융된 메탈을 압전액추에이터가 제어하는 노즐을 통하여 분사시키는 것으로써 액추에이터로 사용되는 적층형 압전액추에이터는 속응성과 더불어 재현성이 매우 중요하게 거론된다. 여기에서, 재현성과 관련된 히스테리시스 특성연구는 메탈 프린팅 성능을 향상시키는 중요한 연구과제 중의 하나이다. 이 논문에서는 직접적으로 압전액추에이터의 변위를 측정하여 히스테리시스 특성을 향상시키는 연구를 수행하였다. Fig. 2는 압전액추에이터가 가지는 히스테리시스 특성을 개선하기 위한 실험장치 개략도를 나타내고 있다. Fig. 3은 이 연구에 사

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

Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus



a) Schematic control block-diagram with inverse hysteresis compensator and PID controller



b) Block-diagram using simulink of matlab

Fig. 3 Block-diagram for PZT actuator position control

용된 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 시스템계수분석(Identification)을 수행하였다. 시스템계수분석은 연구대상으로 하는 압전액추에이터의 스텝응답실험데이터로부터 계수분석방법중의 하나인 PEM계수분석기법을 사용하여 연구시스템과 가장 유사한 특성을 가지는 전달함수를 구하였다.

2.2 시스템계수분석

이 연구에서는 시스템의 빠른 응답성을 보상하기 위하여 앞먹임제어기법과 PID제어기법을 사용하였다. 일반적으로 비선형성은 귀환제어를 통해 해결을 하고 있지만, 진동 제어와 같은 신속한 구동이 필요한 경우의 제어에서 귀환제어는 시간 지연의 문제를 안고 있기 때문에 앞먹임제어등으로 동적인 구동에 있어서의 선형성을 보상하는데는 귀환제어보다 더 효과적이다. 여기서, PID제어기법을 사용하기 위해서는 K_p, K_i, K_d 각각의 게인값들을 구해야 하는데, 게인값을 구하기 위한 방법으로는 Ziegler-Nichols기법이 있다. Ziegler-Nichols 기법은 PID 제어기의 제어이득을 얻기 위한 동조기법 중의 한가지로써, Ziegler-Nichols 동조규칙 두 가지 방법 중에서 제 1방법을 사용하여 제어이득을 구하여낸다. 이 방법은 스텝응답 실험데이터를 이용하는데 응답곡선이 S형상을 가질 때만 사용가능하다. S형상의 곡선은 지연시간과 시정수의 두 개의 상수로 특징지워질 수 있다. 이 곡선의 지연시간과 시정수의 변곡되는 곳에 접선을 그어 비례이득 K_p , 적분시간 T_i , 미분시간 T_d 을 구해 최종적으로 PID게인값들을 구할 수 있다. 구해진 PID게인값은 $K_p=0.7, K_i=60, K_d=0.0004$ 이다. 그러나 Ziegler-Nichols기법으로 구해진 PID게인값이 압전액추에이터의 히스테리시스를 줄이는데 우수하지 못하여 또 다른 기법을 사용하였다. 계수분석기법중의 하나인 PEM(Prediction Error estimate)기법⁶⁾을 사용하였는데 이 기법은 스텝응답에서 얻어진 실험적 데이터를 가지고 에러를 추정하여 실제시스템과 가장 유사한 모델의 전달함수

를 찾는 것이다. 현재 구해진 전달함수는 5차식으로써, PEM기법을 이용하여 찾은 전달함수를 컴퓨터시뮬레이션한 결과로 구해진 PID게인값은 $K_p=0.1, K_i=26, K_d=0.0006$ 이다. 식(1)은 Ziegler-Nichols기법으로 구한 압전액추에이터의 전달함수이며, 식(2)는 PEM계수분석기법을 이용한 전달함수를 나타내고 있다. Fig. 4는 실제시스템의 스텝응답과 Ziegler-Nichols기법으로 찾아낸 전달함수의 스텝응답 및 PEM계수분석기법으로 찾아낸 전달함수의 스텝응답의 특성곡선을 나타낸다. Fig. 4의 특성곡선을 비교하면 Ziegler-Nichols기법보다 PEM계수분석기법의 우수함을 알 수 있다.

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

$$G(s) = \frac{a_1s^4 + a_2s^3 + a_3s^2 + a_4s + a_5}{s^5 + b_1s^4 + b_2s^3 + b_3s^2 + b_4s + b_5} \quad (2)$$

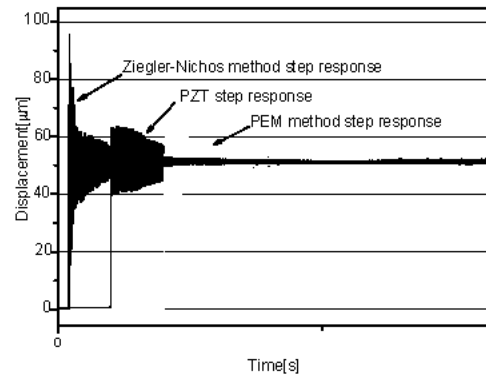


Fig. 4 Step responses of the PZT actuator

여기서, 식(1)의 변수는 $\left(\begin{matrix} \omega_n = 493.651098 \\ \xi = 0.04098950568 \end{matrix} \right)$ 이며, 식(2)의 변수는 아래와 같다.

$$\begin{aligned} a_1 &= 314.8852, a_2 = 345465.4532, a_3 = 69678191.5174, \\ a_4 &= 83693105884, a_5 = -579793475531 \\ b_1 &= 1422.9483, b_2 = -1215701.6722, b_3 = 245192894.4904, \\ b_4 &= -172317153171.267, b_5 = 1106566335141.74 \end{aligned}$$

2.3 역히스테리시스 모델링

기존의 전압과 변위의 기하학적 표현을 근사화한 히스테리시스 모델링 기법에서 히스테리시스 특성을 개선하기 위하여, 히스테리시스가 발생한 변위만큼 역으로 그 입력전압을 구할 수 있는 역히스테리시스 모델링기법을 이용하여 히스테리시스특성을 개선할 수 있다. Fig. 5는 압전액추에이터 제어입력

을 0 ~ 10[V]까지 서서히 증가시킨 후 다시 10 ~ 0[V]까지 서서히 감소시켰다. 그런 후 다시 증가시키다가 3[V] 및 8[V]부근에서 감소시킨 반전점(Turning point)을 가지는 히스테리시스 곡선을 나타내고 있다. 이 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 보간(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 평행이동 시킨 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.

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

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

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

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

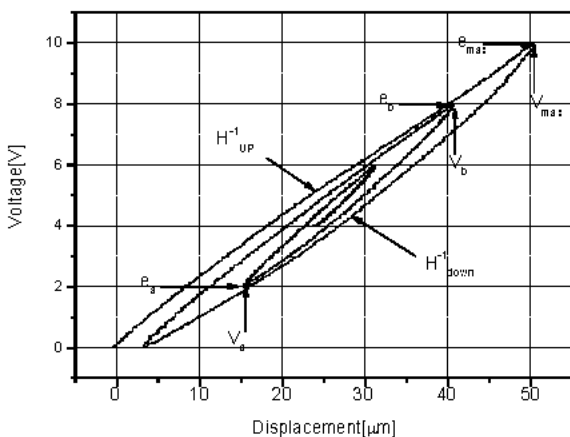


Fig. 5 Hysteresis nonlinearity of the PZT actuator

여기서, e : 현재의 변위, V_a : 하강도중 상승을 시작하는 전압, V_b : 상승도중 하강을 시작하는 전압, e_a : 하강도중 상승을 시작하는 변위, e_b : 상승도중 하강을 시작하는 변위, e_{max} : 하강곡선에서 최대변위, V_{max} : 하강곡선에서 최대전압 이다.

3. 실험 및 연구결과

Fig. 6은 이 실험에 사용된 장치의 구성을 나타내며, Table 1은 실험에 사용된 장비의 목록을 나타낸다. 여기서, 실험에 사용된 제어대상 압전액추에이터의 사양으로 최대구동전압에 대한 변위량은 $68.0[\mu m] \pm 12/150Vdc$ 이며, 최적구동전압에 대한 변위량은 $48.0[\mu m] \pm 12/100Vdc$, 공진주파수는 8[kHz]이다. 실험에서 사용한 AD/DA converter의 샘플링 속도를 1[kHz]로 설정하였다. 그 이유는 실험에 사용된 입력파형이 1[kHz]를 넘지 않으며, 빠른응답성을 가지는 압전액추에이터의 데이터를 과부하없이 처리하기 위함이다.

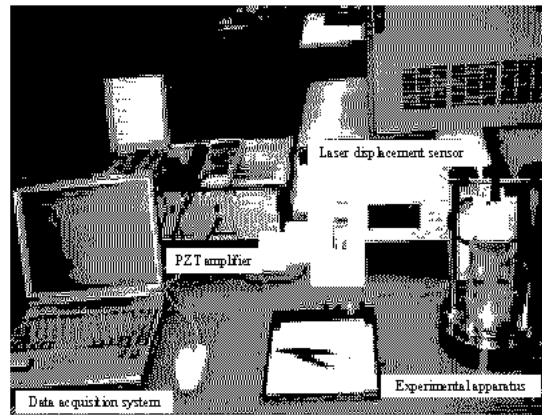


Fig. 6 Photo view of PZT actuator experimental apparatus

Table 1 Equipment list for the experiment

품명	용도	제조사
ASB680C801*F0	압전액추에이터	Tokin
LVPZT E505	압전소자 증폭기	PI
LC2430	변위센서	Keyence
LC2400C	변위계	Keyence
NI6062E	D/A&A/D	NI

이 실험은 첫 번째로 제어기가 없는 상태에서의 압전액추에이터의 히스테리시스 성능실험을 하였으며, 두 번째로는 2절의 수식 (2)에서 구해진 계인값을 이용한 PID제어기를 사용하여 히스테리시스 성

능실험이 이루어졌으며, 마지막으로 2절의 수식 (2)로부터 구해진 PID제어기와 수식 (3)과 수식 (4)로부터의 역히스테리시스 모델링 기법을 사용한 상태에서의 히스테리시스 성능실험이 이루어졌다. 각각의 히스테리시스 특성은 Table 2에서 나타내었다. 따라서, 이들 결과로 PID제어보다 PID제어+역히스테리시스 모델링기법의 우수성이 확인되었다.

Table 2 Hysteresis results

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

Fig. 7은 아무런 제어기가 없는 상태에서 전압에 대한 압전액추에이터의 변위를 측정하여 압전액추에이터가 가지는 히스테리시스를 측정하였으며, 동일한 압전 액추에이터에 PID제어기를 사용하여 동일한 전압에 대하여 구동하는 변위를 측정하여 히스테리시스를 나타낸 것이다. 그래프로 확인이 가능하겠지만 PID제어기만을 사용한 것이 히스테리시스를 많이 개선시킴을 알 수 있다. Fig. 8은 PID제어기에 역히스테리시스 모델링기법 추가하여 전압에 대한 변위를 측정하여 히스테리시스 특성곡선을 나타낸다. 각각의 실험으로 구해진 히스테리시스 특성곡선을 비교하면 이 연구에서 사용한 제어기에 있어 히스테리시스 특성이 PID 제어기만을 사용하였을 때 3.118%에서 PID+역히스테리시스 모델링 기법을 사용하였을 때가 0.77%로 약 4배 가까이 개선되었음을 알 수 있다. 또한, 히스테리시스는 전압의 갑작스럽게 변화하는 반전점(Turning Point)에서 가장 크게 나타나므로 이것에 대한 제어도 수행되어

져야 한다. 따라서 각종 파형을 인가하여 이 연구에서 사용된 제어기가 얼마나 빠른 응답성을 가지는가를 실험하였다. Fig. 9와 Fig. 10은 반전점과 같은 갑작스러운 전압의 변동을 가지는 삼각파와 정현파에 대한 추정실험을 한 결과를 나타내었다.

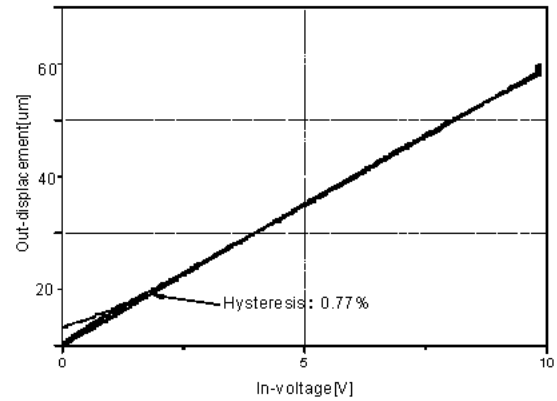


Fig. 8 Result of inverse hysteresis model compensating & PID control

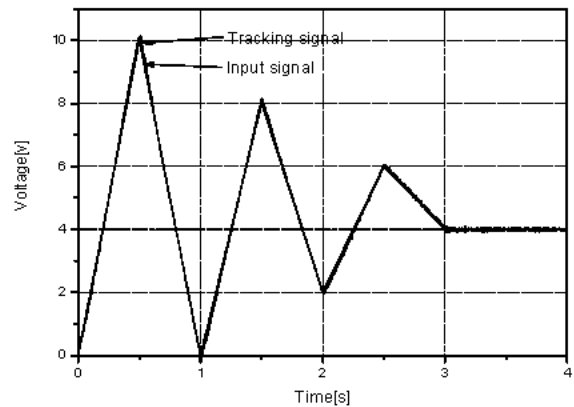


Fig. 9 Lamp response characteristics of PZT actuator

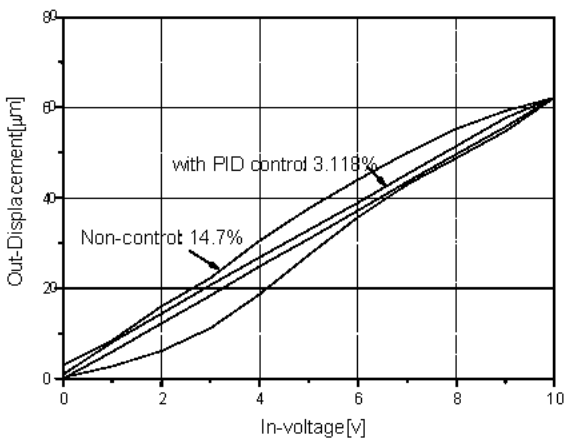


Fig. 7 Hysteresis characteristics of PZT actuator

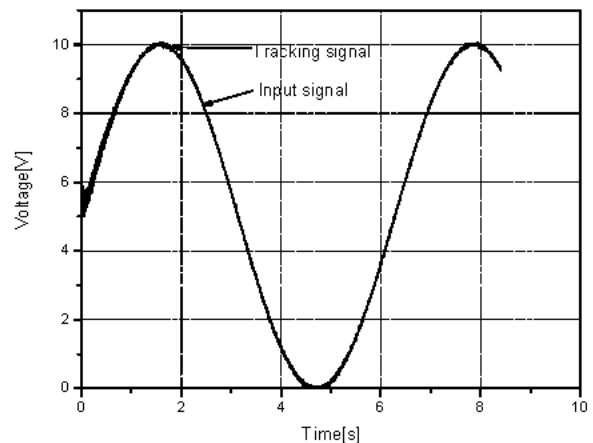


Fig. 10 Sine response characteristics of PZT actuator

4. 결 론

이 연구에서는 적층형 압전액추에이터의 히스테리시스 특성개선을 위하여 PID제어기법+역히스테리시스 모델링기법에 대한 논의가 이루어졌다. PEM계수분석기법을 이용하여 실제시스템과 가장 유사한 특성을 가지는 전달함수를 구하였으며, 구해진 전달함수를 이용하여 컴퓨터시뮬레이션을 수행하여 최적의 PID제어값을 구하였다. 그 결과, 이 연구에서 수행한 PID제어기법+역히스테리시스 모델링기법이 무제어 일 때의 히스테리시스를 비교하면 14.7[%]에서 0.77[%]로 히스테리시스가 상당히 감소함을 실험을 통하여 확인하였다. 이 연구의 결과는 전자종이(Electric paper)와 RFID구현 메탈 프린팅 및 미세위치제어기술향상에 크게 기여할 것으로 기대된다.

참고 문헌

1. K. Yamaguchi, K. Sakai, T. Hirayama, T. Yamanaka, 1998, "Generation of Three-dimensional Structure Using Metal Jet", Journal of JSPE, Vol. 64, No. 10, pp. 1497-1501.
2. K. Yamaguchi, K. Sakai, T. Yamanaka, 1999, "Generation of Three-dimensional Micro Structures Using Metal Jet-Bonding Strength Between Metal Drops", Journal of JSPE, Vol. 65, No. 11, pp. 1639-1644.
3. Michael Goldfarb and Nikola Celanovic, June 1997, "Modeling Piezoelectric Stack Actuators for Control of Micromanipulation", IEEE control systems.
4. Timothy Chang and Xuemei Sun, Jan. 2002, "Analysis and Control of Monolithic Piezoelectric Nano-Actuator", IEEE Transactions on control systems technology, Vol. 9, No. 1.
5. P. Ge and M. Jouaneh, 1996, "Tracking Control of a Piezoceramic Actuator", IEEE transactions on control systems technology, Vol. 4, No. 3 and N. C. Boydston, Jul/Aug. 1999, "Thermally actuated microbeam for large in plane mechanical deflections", J. Vac. Sci. Technol. A, Vol. 17, No. 4, pp. 2257-2263.
6. Bahram Shahian and Michael Hassul, 1993, "Control System Design Using Matlab", Prentice-Hall International Inc.