

메탈젯용 PZT 액츄에이터 제어기 성능향상에 관한 연구

윤소남* · 조정대* · 이택민*

A Study on the Performance Improvement of PZT Actuator Controller for Metal Jet

Sonam YUN · Jeongdai JO* · Taikmin Lee**

ABSTRACT

A metal jet printing system based on ink jet printing technique is one of the effective equipments for manufacturing elements of display devices, electrical devices, information processing systems, and so on. In order to develop an actuator of the metal jet printing system, bimorph type PZT actuator(length : 25.2mm, width : 7.2mm, thickness : 0.5mm , shim thickness : 0.2mm) and its controller(voltage range : $\pm 24V$, built-in fast recovery diode) were suggested and investigated. Performance tests and characteristic analysis, such as displacement, force, hysteresis and frequency, were carried out. The results show that the suggested actuator and controller are suitable for the metal jet printing system.

Key Words : PZT actuator(압전 액츄에이터), PZT actuator controller(압전액츄에이터 제어기), PZT actuator driver(압전액츄에이터 구동기), Bimorph PZT(바이모프 압전소자)

* 첨단산업기술연구부 정보장비그룹 선임연구원

기호설명

- h : 압전액츄에이터 변위 [m]
 d_{31} : 압전상수 [m/V, C/N]
 l : Cantilever 길이 [m]
 t : Cantilever 두께 [m]
 V : 입력공급전압 [V]
 w : Cantilever 폭 [m]
 F_b : 압전액츄에이터 발생력 [N]
 S_{11} : 압전재료의 탄성상수 [m^3/N]
 f_r : Cantilever 공진주파수 [Hz]
 p : 압전 밀도 [kg/m^3]

1. 서 론

3차원 조형이 가능한 메탈젯 프린팅 방식은 기존의 프린팅 분야에 사용되고 있는 잉크젯 방식을 확장한 것으로 실제 금속재료를 용융해서 조형을 행할 수 있으며, 멀티노즐방식을 채용하여 여러 종류의 재료를 동시에 사용할 수 있는 장점이 있기 때문에 최근 나노기술 및 전자정보 기술분야에 있어 중요한 연구과제 중의 하나라고 할 수 있다.^{1)~3)}

또한, 메탈젯 시스템의 핵심 구성요소 중의 하나인 PZT 액츄에이터는 고온에서 용융된 메탈을 일정한 크기의 액적 (droplet)을 형성하여 노즐을 통해 조형할 수 있도록 선형성 및 반복성이 우수해야 하며, PZT제어를 위한 제어기의 역할도 매우 중요하다.⁴⁾ 본 연구에서는 메탈젯용 PZT 액츄에이터 제어를 위한 기본 연구로서, 기계산업 분야의 에너지 절약화, 소형·경량화, 고성능화, 장수명화, 저가격화 및 고신뢰성 등의 요구조건을 만족하는 이

성분계(二成分系) 압전 세라믹인PZT(Pb(Zr, Ti)O₃) 액츄에이터를 설계 및 제작하였으며, 액츄에이터 구동용 제어기를 개발하여 특성시험과 성능시험을 수행하였다.

PZT 액츄에이터는 주파수 발생기, 전원공급장치, 로드셀 및 레이저 변위측정기로 구성된 간이 시험장치를 이용하여 동작 특성 시험인 정적 또는 동적 변위특성시험, 힘 특성시험, 히스테리시스 특성시험 및 주파수 특성시험을 하였으며, 액츄에이터의 응답 특성 및 위치제어 정밀도가 기존의 제품보다 우수하다는 것을 확인하였다. PZT 액츄에이터 제어기의 성능 평가를 위해 구동전압 특성 및 정지특성 시험을 수행하였으며, 전압손실비, 구동시간지연(on-time delay)과 정지시간지연(off-time delay)을 측정하여 제어기의 성능을 확인하였다.

2. PZT 액츄에이터 및 제어기

2.1 PZT 액츄에이터 설계

PZT 액츄에이터는 크게 직선 변위형과 굴곡변위형으로 나뉘어지며, 직선변위형에는 단판형과 적층형, 굴곡변위형에는 유니모프(unimorph), 바이모프(bimorph) 및 멀티모프(multimorph)가 있다. 바이모프형은 분극 방향에 따라 병렬형(parallel type) 또는 직렬형(serial type)으로 나누어진다.⁷⁾ 바이모프형 PZT 액츄에이터는 Fig. 1과 같이 금속 탄성판을 중심전극으로 두장의 압전 세라믹스의 얇은 판을 접착제로 접합시킨 구조이며, 두장의 압전 세라믹스에 한면은 늘어나는 방향, 다른 한면은 수축하는 방향으로 전압을 인가하면 인가전압의 크기에 비례하는 변위를 얻

을 수 있다.⁸⁾ 바이모프형 액츄에이터의 변위는 바이모프의 유효 길이, 두께 및 인가전압이 주요 변수이며, 큰 변위를 발생하기 위해 압전 상수 (d_{31})가 큰 재료로 제작하였다.

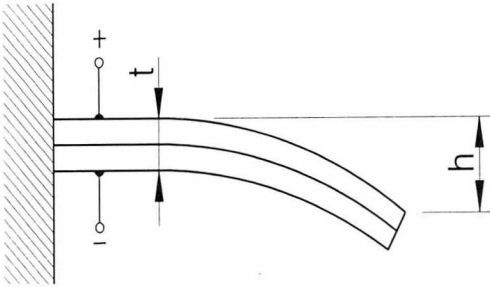


Fig. 1 Schematic of bimorph type PZT actuator

바이모프형 PZT 액츄에이터의 변위에 대한 식은 다음과 같다.

$$h = \frac{3}{2} d_{31} \times \frac{\ell^2}{t^2} V \quad (1)$$

$$F_b = \frac{2 \cdot w \cdot t}{\ell} \frac{d_{31}}{S_{11}} V \quad (2)$$

$$f_r = 0.158 \frac{t}{\ell^2} \sqrt{\frac{1}{\rho S_{11}}} \quad (3)$$

개발된 PZT 액츄에이터는 바이모프 길이가 25.2mm, 폭이 7.2mm와 전체 두께는 0.5mm 이고, 탄성체 Shim은 0.2mm carbon plate를 사용하여 설계 및 제작하였다.

2.2 PZT 액츄에이터 제어기 설계

기존에 연구된(독일, H사) PZT 액츄에이터 구동회로는 Fig. 2와 같으며, Fig. 3은 본 연구에서 개발한 DC 24V 전용 PZT 액츄에이터 구동회로이다.⁹⁾

기존 연구된 구동회로는 트랜지스터의 바이어싱(biasing) 동작에 의해 입력 전압을 AC/DC 24~220V로 가변해도 출력이 DC 24V로 일정한 정전압 회로이지만, 개발된 새로운 회로는 트랜지스터 바이어싱 회로를 IC형으로 구성하여, 회로의 구조를 간단하게 하였으며, 전원 차단시 바이모프에 충전된 전하를 방전시키기 위하여 고속의 FRD(fast recovery diode)를 설계하였으며, 전원 차단시간 지연을 최소화하여 응답속도와 동작특성을 향상 시켰다. 정전압 출력 방식의 구현을 위하여 입력단에 브리지다이오드를 설계하였다.

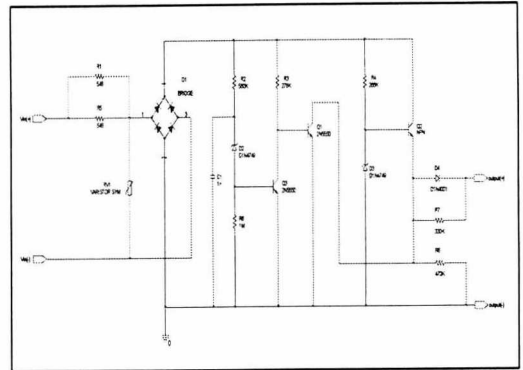


Fig. 2 Schematic of previous PZT actuator driving circuit

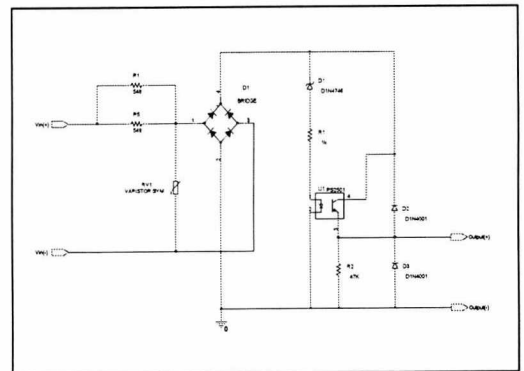
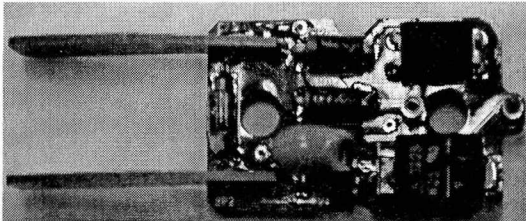
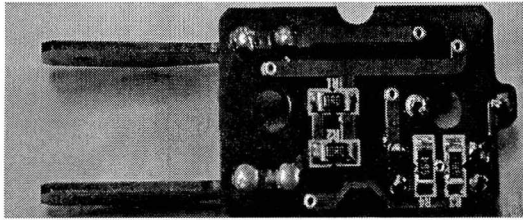


Fig. 3 Schematic of developed PZT actuator driving circuit for DC24V

본 연구에서 제안한 구동회로로 제작된 PZT 액츄에이터 제어기 시제품은 Fig. 4와 같다.



(a) top view



(b) bottom view

Fig. 4 Photo of developed PZT actuator controller

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 PZT 액츄에이터 특성실험 결과

변위측정용 레이저 센서를 이용하여 PZT 액츄에이터에 변위를 정적 또는 동적인 상태에서 측정하는 변위특성시험을 수행하였다.

Fig. 5는 PZT 액츄에이터의 변위시험 결과이며, 최대 변위가 63 μ m이고, 채터링(chattering) 현상은 있지만, 비교적 안정된 반복특성을 유지하였다.

Fig. 6의 힘 특성시험은 PZT 액츄에이터를 로드셀에 접하게 한 상태에서 압전 액츄에이터에 정격전압을 가하여 발생하는 힘을 측정하였다. 개발된 PZT 액츄에이터는 약 5.25gf

의 힘이 발생되었으며, 동작 및 정지 특성이 매우 좋음이 확인되었다.

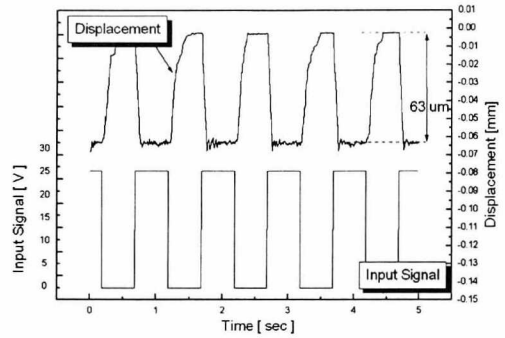
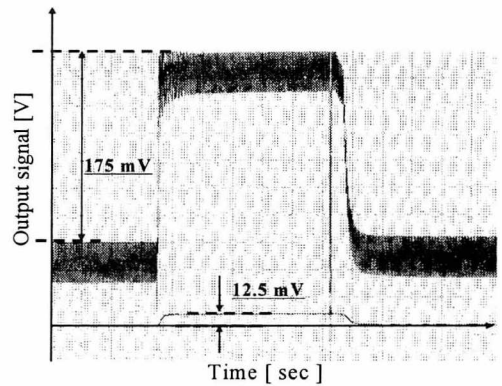


Fig. 5 Result of displacement characteristics test



Force: 30g/V

Displacement: 1mm/V

Force = 0.175 V \times 30g/V = 5.25g

Displacement = 0.0125 V \times 1mm/V = 12.5 μ m

Fig. 6 Result of force characteristics test

Fig. 7은 개발된 PZT 액츄에이터의 히스테리시스 특성 결과이며, 상승 초기점 및 하강 종료점 사이의 오차가 매우 작으며, 제어기의 특성상 22V 이상에서 자동적으로 동작하는 것을 알 수 있다.

개발된 PZT 액츄에이터의 주파수 특성시험

결과는 Fig. 8에 나타내었으며, 기존 PZT 액츄에이터와 동일하게 on/off 주기로 환산해서는 약 15Hz까지 동작하고, 스위칭 동작으로 환산해서는 약 40Hz까지 구동하는 것을 확인하였다.

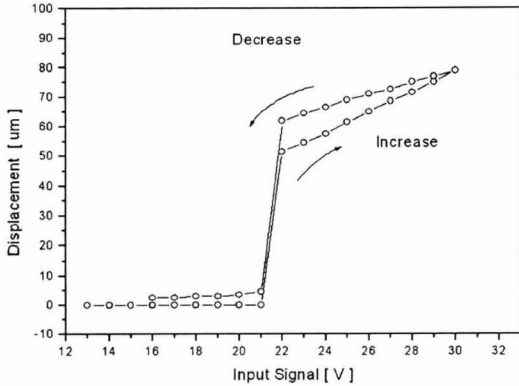


Fig. 7 Result of hysteresis characteristics test

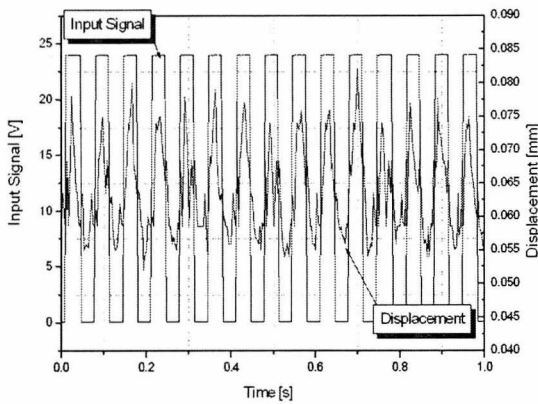


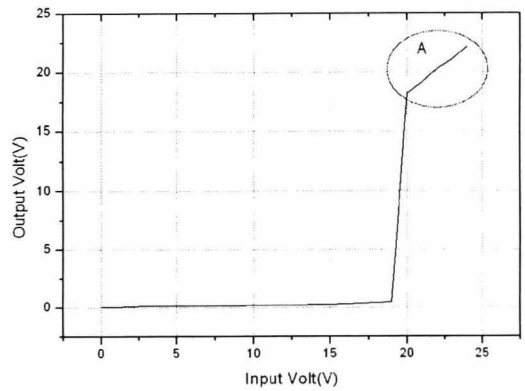
Fig. 8 Result of frequency characteristics test

3.2 PZT 제어기 성능실험 결과

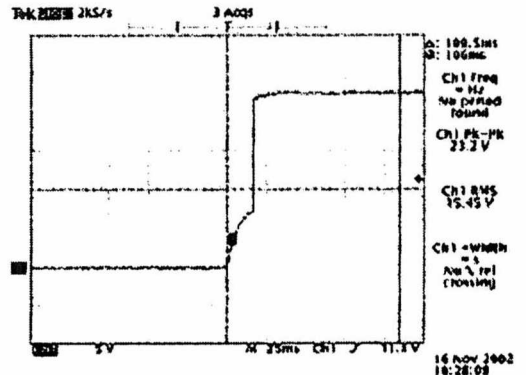
제작된 PZT 액츄에이터 제어기의 성능평가

를 위하여 입력전압을 DC 24V까지 가변시켜 on/off 동작 특성을 시험하였다.

Fig. 9는 기존 제어기의 입력전압에 대한 출력 전압 그래프 결과이다. 실험 결과, 제어기는 입력에 대한 출력비가 약 8~10%의 손실을 발생하는 회로였으며, 20V의 입력전압에서 실제적인 작동이 행해지고, 구동시간지연은 20ms로 측정되었다.



(a) Turn on time characteristics on DAQ

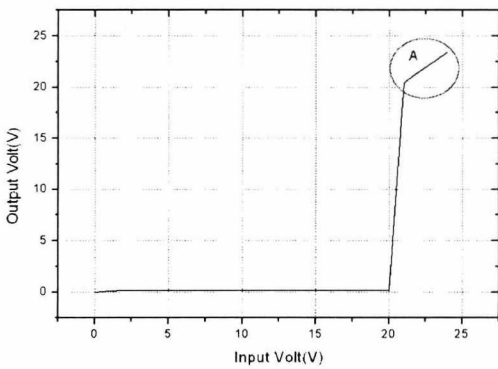


(b) Turn on time characteristics on oscilloscope

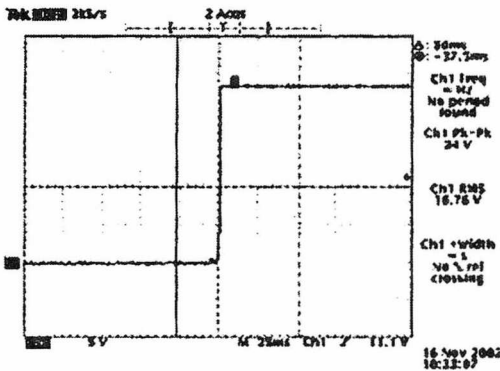
Fig. 9 Results of turn on time characteristics test to previous PZT actuator controller

Fig. 10 (a)와 (b)는 본 연구에서 개발한 PZT 액츄에이터 제어기의 출력 전압 그래프 결과이다.

구동회로의 입력전압에 대한 출력전압비가 약 2.5~2.6%의 손실이 발생하는 것을 확인하였으며, 21V의 입력에서 실제적인 작동이 되었으며, 구동시간지연은 1ms였다. 실험 결과, 동작전압(turn-on volt)은 높고, 전압 손실비가 기존 액츄에이터 제어기보다 낮다는 것을 확인하였다.



(a) Turn on time characteristics on DAQ



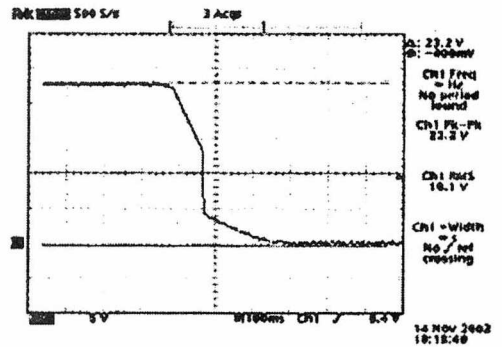
(b) Turn on time characteristics on oscilloscope

Fig. 10 Results of turn on time characteristics test to developed PZT actuator controller at DC24V

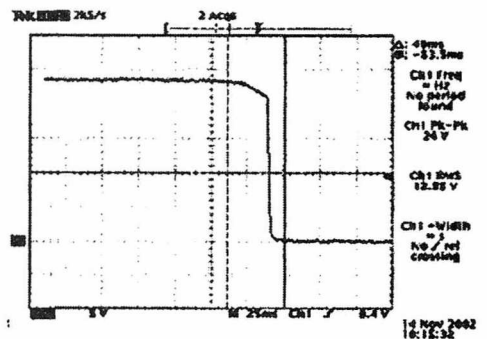
Fig. 11 (a)는 기존 PZT 액츄에이터 제어기의 정지시간(turn-off time)에 대한 전압 변화를 나타낸 결과이며, 측정결과 정지시간지연은 360ms였다.

Fig. 11 (b)는 본 연구에서 개발한 제어기의 정지시간에 대한 전압 변화를 나타낸 것이며, 정지시간지연은 125ms이다.

기존 제어기와 본 연구에서 개발한 PZT 액츄에이터 제어기의 동작과 정지시의 시간에 대한 전압 변화를 비교 실험한 결과, 기존의 구동 제어기보다 기울기가 급격하다는 것이 확인되었다.



(a) Turn off time characteristics of previous PZT actuator controller



(b) Turn off time characteristics of developed PZT actuator controller

Fig. 11 Results of turn off time characteristics

Fig. 12는 본 연구자들이 제안하는 메탈젯 시스템의 개략을 보이는 것으로 용융메탈의 산화방지장치 및 압력제어장치를 내장하고 있으며, 분해조립이 쉬워 세정이 용이할 뿐만 아니라 제작단가도 저렴한 장점을 가지고 있다. 연구자들이 제안하는 Fig. 12의 시스템에 내장된 적층형 PZT 액추에이터는 본 연구에서 수행된 바이모프형 PZT 액추에이터에 비해서 구동력은 크나, 변위가 매우 작기 때문에 사용전압이 높으며 액적 생성을 위하여 미세제어기술이 필요하기 때문에 본 연구에서 수행된 제어기 설계기술 및 제어기술이 매우 유용하게 응용될 수 있을 것으로 사료된다.

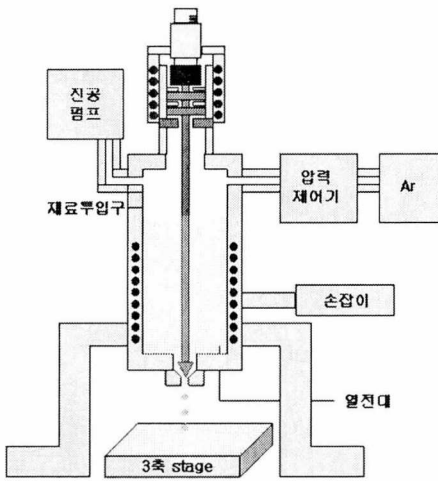


Fig.12 Schematic of the metal-jet system

4. 결 론

본 연구에서는 메탈젯용 PZT 액추에이터 제어기 성능 향상을 목적으로 시험대상 PZT 액추에이터와 구동회로를 설계 및 제작하였으며, 동작특성시험과 성능시험을 수행하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) PZT 액추에이터에 대하여 동작특성시험인 변위, 힘, 히스테리시스 및 주파수 특성시험을 수행하였으며, 변위가 $63\mu\text{m}$, 힘이 5.25gf 이고 응답성이 40Hz 인 성능과 안정된 반복특성 결과로 기존의 제품보다 우수하다는 것이 확인되었다.
- 2) PZT 액추에이터 제어기의 성능평가를 위하여 구동 및 정지 특성시험을 하였으며, $2.5\sim 2.6\%$ 의 전압손실, 1ms 의 구동시간 지연, 125ms 의 정지시간지연과 21V 의 동작전압이 측정되었으며, 성능을 비교한 결과, 동작전압은 높고 전압 손실비가 기존 액추에이터 제어기보다 낮고, 기울기가 급격하다는 것을 확인하였다.
- 3) 개발된 PZT 액추에이터와 구동 제어기는 기계산업 분야의 요구조건을 만족할 뿐만 아니라, 이를 응용한 시험시스템 개발과 시험, 음향기기, 초음파기기, 통신기기, 계측기와 진동제어 구동용등 관련 산업 전반에 매우 유용하게 활용할 수 있으리라 판단된다.

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, M. Yamasaki, "Generation of Three-dimensional Micro Structures Using Metal Jet-Bonding Strength Between Metal Drops -", Journal of JSPE, Vol.65, No.11, pp. 163 9~1644, 1999

3. K.Yamaguchi, "Micro-Prototyping by Metal Jet and It's Applications", 초미립 가공학회지 Vol.45, No.6, pp.274~277, 2002
4. 김광영 외 6인 "2003년 기본사업 보고서", 한국기계연구원, 2003
5. "세라믹 압전소자를 이용한 저 소비전력형 공압 솔레노이드 밸브 개발보고서", 산업자원부, 2003.
6. Johannes Wirtl, "The physical laws of piezo-ceramic", PIEZO2000, 2000.
7. 임영모, "압전소자를 이용한 선형 액츄에이터의 개발", KAIST, 1994.
8. 신종우, "압전소자로 구동되는 변위 확대기구에 대한 기초연구", 서울대학교, 1994.
9. "PZT Actuator Driver", NEC, 1998. 10. "OPA445 Data Sheet", Burr-brown, 2000.