

가변 스텝 마이크로 액츄에이터의 설계 및 구동특성

임 영 모,* 김 수 현,** 박 기 환,*** 곽 윤 근**

Design and Performance Evaluation of Micro Stepping Actuator with a Variable Step Size

Y. M. Lim,* S. H. Kim,** K. H. Park,*** Y. K. Kwak**

ABSTRACT

A new actuating mechanism suitable for a micro positioning device is developed using piezo-electric elements. The actuator can make a step movement of $0.5\mu\text{m}$ up to $3.5\mu\text{m}$. The step size can be adjusted on demand. By repeating this step action, long distance movement is achieved. Precise positioning can be obtained by combining the coarse motion with the maximum step size and fine motion. Two types of fine motion have been proposed for a driving method. Firstly, feedback control based on PID is applied. The other is simply repeating the minimum step movement until a target position is reached. The experimental results for the two method are presented.

Key words : Piezoelectric element(압전소자), Precise positioning(정밀 위치결정), Micro actuator(마이크로 액츄에이터), Fine motion(미세구동), Variable step size(가변 스텝)

1. 서 론

산업기술이 발전함에 따라 각종 전동기나 액츄에이터 등의 정밀화 및 소형화의 필요성이 증가해 가고 있다. 따라서 기존 구동장치에 있어서 소형, 경량이면서도 고정밀도를 달성하는 수단으로 압전소자, 형상기억합금, 정전 액츄에이터등 새로운 원리를 이용한 액츄에이터의 개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.^{1,2)} 그 중에서도 압전 소자는 기존의 유·공압, 전기 서보 모터 등

에 비해 정밀구동성, 빠른 응답속도, 작은 크기등의 장점을 가지고 있으므로 초정밀 가공기의 공구 미세조정기, 레이저 발진기의 경면 정밀 보정기,³⁾ STM(Scanning Tunneling Microscope)등⁴⁾의 정밀 구동기로서의 응용이 확대되고 있다. 그러나 압전소자는 수 μm 정도밖에 변위를 발생시킬 수 없으므로 큰 이동거리가 필요한 경우 변위를 증폭할 수 있는 수단이 필요하다. 큰 이동거리를 얻는 방법으로 큰 변위구동이 가능한 액츄에이터를 함께 사용하거나 지레 방식을 응용한 변위증

* 한국과학기술원 기계공학과
 ** 한국과학기술원 기계공학과
 *** 한국과학기술원 기계공학과

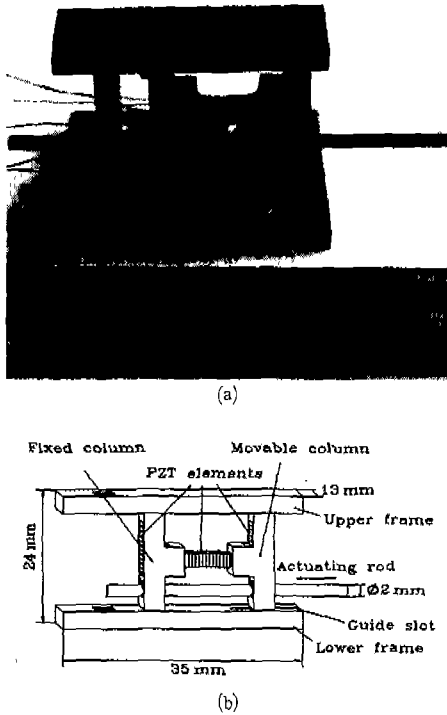


Fig. 1 Structure of stepping actuator

폭 기구를 사용하였다. 이러한 방법들은 크기가 커지며 구동장치가 복잡해지는 문제점이 있다.

본 연구에서는 적층형 압전소자(multilayer piezoelectric element)를 사용하여 원리적으로는 이동범위에 제한이 없고 위치정밀도는 $0.05\mu\text{m}$ 이하이면서 소형인 선형 액츄에이터를 개발하였다. 본 액츄에이터는 이동이 일정한 스텝변위가 축적되면서 이루어지고 큰변위 구동(coarse motion)의 스텝변위는 임의로 조절이 가능하다. 미세구동(fine motion)은 큰변위 구동 후에 이루어지며 단위 스텝 변위 구간내에서의 잔여 이동거리를 결정하게 된다.

2. 선형 액츄에이터의 설계

2.1 선형 액츄에이터의 구조

본 연구에서 설계한 선형 액츄에이터는 Fig. 1의 (a)와 같고 구조는 (b)와 같다. 선형 액츄에이터는 외부와 연결되는 구동봉(actuating rod)과 이 봉을 구동시키는 "H" 형태의 몸체로 되어 있다. 몸체에 사용된 압전소자는 3개로 적층형(Tokin, NLA $2\times 3\times 9\text{mm}$)이며,

좌측의 고정 수직기둥(fixed column), 우측의 가동 수직기둥(movable column) 그리고 두 수직기둥을 연결하는 수평방향의 압전소자로 구성되어 있다. 양쪽옆의 수직기둥에 부착된 압전소자는 구동봉의 고정과 풀림에 이용된다. 왼쪽의 수직기둥은 위, 아래의 틀(frame)에 고정되어 있고, 오른쪽의 수직기둥은 틀을 따라 좌우로 이동할 수 있게 되어 있다. 또한, 가운데에 수평으로 부착된 소자의 신축은 구동봉을 좌우 방향으로 이동시키는데 사용된다.

Fig. 2는 액츄에이터의 전면에서 본 단면도로 수직기둥이 포함된 부분을 나타낸 것이다. 압전소자는 부착된 미소 회전관절(revolute joint)을 통하여 구동봉에 수직력을 가하게 된다. 압전소자의 최대 변위는 $6.5\mu\text{m}$ 이고 압전소자가 신장되어 구동봉을 잡지 않았을 때 구동봉이 외부 작용력에 의하여 미끄러짐을 방지하기 위하여 일정한 초기 수직력이 구동봉에 가하여 지도록 되어 있고 이에 따른 마찰 저항력을 갖게 된다. 구동봉의 이동방향은 가동 수직기둥 내에 부착된 압전소자가 신장하여 구동봉이 고정된 후 가동 수직기둥이 움직이는 방향이다.

가동몸체의 길이는 23mm, 폭은 13mm, 높이는 24mm, 그리고 구동봉은 지름이 2mm로 기존의 다른 선형 이동기구에 비해 크기가 작으며, 또한 대단히 정밀한 이동 위치를 구현할 수 있게 "H" 형태의 가동몸체는 고정되어 있고 대신 얇고 가벼운 구동봉이 이동하게 하여 운동부분의 무게를 크게 줄였으며 구동봉이 가늘고 작기 때문에 협소한 공간에서도 대상을 구동할 수 있는 장점이 있다.

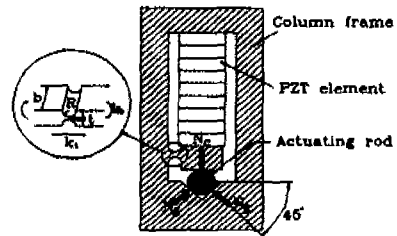


Fig. 2 Sectional view

2.2 구동원리

Fig. 3은 액츄에이터의 구동원리를 설명한 것이다. Fig. 3에서 (a) 과정은 B의 압전소자가 신장되어 우측의 가동 수직기둥이 좌측보다 더 큰 힘으로 구동봉을

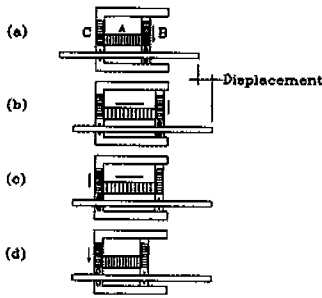


Fig. 3 Principle of operation

고정하고 있는 상태이다. (b)과정은 (a)의 상태에서 수평하게 있는 A의 압전소자가 신장되어 우측의 가동 수직기둥이 구동봉을 우측으로 끌어서 이동시킨 상태이다. 그림에서 볼 수 있듯이 이 과정에서 액츄에이터의 변위가 생기게 된다. (c)와 (d) 과정은 귀환과정 (returning process)으로 A가 전부 신장된 다음 C가 신장되고 B는 수축하여 좌측의 고정 수직기둥이 우측보다 더 큰 힘으로 구동봉을 고정하게 된다. (d) 과정은 A가 수축하여 구동봉은 우측으로 이동한 상태가 유지되면서 가동 수직기둥만 제자리로 돌아가는 과정이다. 이와 같이 (a)-(d)의 과정을 반복하면 이동변위를 축적할 수 있으며 구동봉의 좌측 이동은 역순으로 작동하여 이루어 진다.

Fig. 3에 보인 작동을 하기 위한 구동입력은 Fig. 4와 같다. 각 압전소자에 입력되는 전압은 on(100V)-off(0V)의 형태로 입력되며 일정한 주기 T로 반복된다. 0V에서 100V까지의 최대 전압 상승시간 (rising time)을 실험에 의하여 측정한 결과 0.8ms이었다. 순차적으로 입력되는 입력신호 사이에는 최대 전압 상승 시간보다 큰 시간지연(ΔT, time delay)을 두어야 한

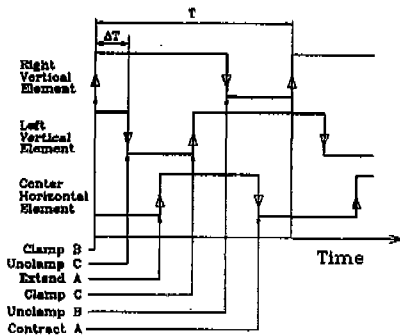


Fig. 4 Actuator drive signal

다. 액츄에이터가 단위 스텝변위를 얻기 위해서는 Fig. 4에서 보는 바와 같이 6회의 on-off 변화가 있어야 하므로 구동 주기 T는 6ΔT가 된다. 따라서, 가능한 최소 스텝구동 주기 T는 4.8ms이다.

2.3 액츄에이터의 축방향 외력

수직기둥의 내부구조는 Fig. 2와 같다. 이 그림에서 확대하여 보여주고 있는 노치 부분이 회전관절 역할을 하게 되어 구동봉과 압전소자 부분의 조립시 결합을 쉽게 하여준다.

구동봉과 압전소자는 억지끼워 맞춤의 방법으로 조립되었기 때문에 구동봉에 일정한 초기 수직력 (preload)이 걸리게 된다. 이러한 기계적인 요소에 의한 초기 수직력은 액츄에이터의 정지시에도 구동봉이 축방향의 외력 (external force)에 의해 움직이지 않게 한다.

액츄에이터의 구동시 구동봉에 작용하는 수직력은 초기 수직력과 수직방향의 압전소자가 구동봉에 가하는 수직력으로 이루어 진다. 구동봉에 걸려 있는 초기 수직력을 N_c 라 하고 압전소자의 자유상태 (free load)에서의 변형량을 ΔL이라 할때, 구동봉에 작용되는 수직력 N_g 는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$N_c = k_p \Delta L + N_{ci} \tag{1}$$

여기서, k_p 는 압전소자의 강성계수 (stiffness coefficient)로 1.9N/μm이다.⁽⁶⁾

구동봉에 수직력 N_g 가 인가되었을 때 아래의 안내면에 의한 구동봉에 대한 수직항력은

$$N_g = \frac{N_c}{2 \sin 45^\circ} \tag{2}$$

으로 구할 수 있고, 구동봉에 작용하는 최대 마찰력 F_f 은 다음과 같다.

$$F_f = \mu N_c + 2\mu N_g \tag{3}$$

여기서, μ 는 구동봉과 접촉면 사이의 마찰계수이다. 식(3)에 식(2)를 대입하여 정리하면 F_f 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_f = (1 + \sqrt{2})\mu N_c \tag{4}$$

실험을 통하여 액츄에이터의 정지시 구동봉이 움직이기 시작한 축방향 외력 (F_0)을 측정한 결과 3.7N이었다. 양쪽의 수직기둥에 의해 구동봉에 작용하는 수직력 N_c

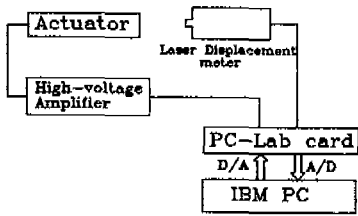


Fig. 5 Experimental setup

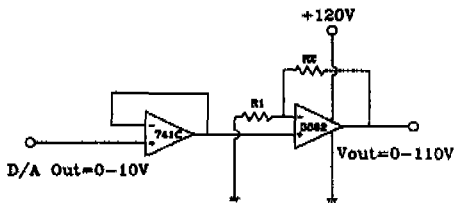


Fig. 6 High voltage amplifier

는 초기 수직력 N_c 로 같으므로 각 수직기둥에서 작용하는 마찰력 F_f 는 F_c 의 $\frac{1}{2}$ 이 된다. 스테인레스강 사이의 정지 마찰계수 μ 는 0.53⁶⁾이므로 식(4)에 의해 초기 수직력은 1.4N이 된다. 액추에이터 구동봉이 미끄러지지 않고 이동할 수 있는 축방향 외력의 최대치는 양단 수직기둥에서 구동봉에 가하는 수직력의 차에 의하여 결정된다. 미끄러짐이 없는 최대 외력은 가동 수직기둥에 의하여 수직봉에 작용되는 최대 정지 마찰력과 고정 수직기둥에 의한 최대 정지마찰력의 차이가 된다. 압전소자에 100V를 인가하였을 때 ΔL 은 6.5 μ m이므로 구동봉의 수직력 N_c 는 식(1)에 의해 13.8N이고 전압을 인가하지 않은 수직기둥에서의 수직력은 초기 수직력인 1.4N이 된다. 따라서 식(4)에 의해 양쪽 수직기둥에 의해 구동봉에 걸리는 마찰력의 차이를 구하면 액추에이터 구동시 구동봉이 미끄러지지 않을 최대 축방향 외력은 15.9N이 된다.

3. 정밀 위치제어

3.1 실험장치

선형 스텝액추에이터의 정밀 위치제어에 대한 실험을 수행하기 위하여 Fig. 5와 같이 실험장치를 구성하였다. 액추에이터 구동봉의 변위는 Laser Displacement meter (Keyence 社)를 사용하여 측정하였으며 최소 변위 분해능은 0.05 μ m이다. 압전소자에 전압을 인

가하기 위한 고전압 증폭기는 Fig. 6과 같이 Burr-Brown사의 3582 J 오피 앰프(OP Amp)를 사용하여 제작하였고 최대 발생전압은 110V이다.

3.2 큰변위 구동과 미세 구동

Fig. 7은 수평방향으로 설치된 압전소자에 인가된 전압의 변화에 따른 구동봉의 이동특성을 나타낸 것이다. 구동봉의 이동이 스텝수에 따라 선형적인 것을 관찰할 수 있다. 또한, 최대 스텝변위는 3.5 μ m이며 안정적인 스텝변위 운동이 가능한 최소 스텝변위는 0.5 μ m 정도이다. 반복실험한 결과 최소 스텝변위가 0.1 μ m까지 가능한 것을 실험적으로 확인하였다. 그러나 이때는 안정된 스텝변위를 얻을 수가 없었다. 위의 실험결과로부터 구동시 안정적인 스텝변위는 0.5 - 3.5 μ m 범위에서 임의로 조절할 수 있음을 알 수 있었다.

Fig. 8은 액추에이터의 단위 스텝구간이 3.5 μ m일 때 단위 스텝구간내에서 위치(여기서는 3 μ m)에 도달할 수 있는지를 보여주는 미세구동 특성에 대한 실험결과이다. 디지털 PID제어를 사용하여 위치제어를 수행하였다. 기

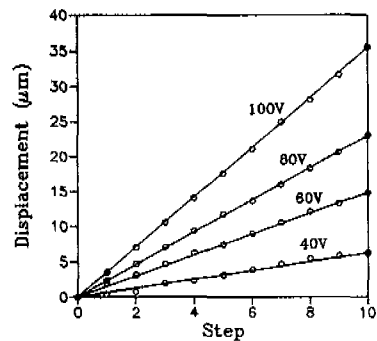


Fig. 7 The characteristics of coarse motion

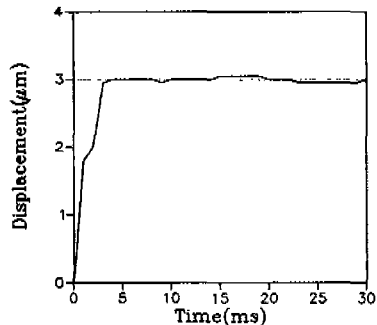


Fig. 8 Fine motion control

준입력은 컴퓨터에서 만들어 주며 Laser Displacement Meter를 통해 얻은 구동봉의 이동량은 컴퓨터에 입력되어 위치오차(e_n)가 계산된다. 제어입력(u_n)은 다음의 식으로 계산되어 D/A변환기를 통하여 액츄에이터를 구동하기 위한 고전압 증폭기에 입력된다.

$$u_n = K \left(e_n + K_i \sum_{j=1}^n e_j T_s + K_d \frac{(e_n - e_{n-1})}{T_s} \right) \quad (5)$$

여기서, T_s 는 샘플링 시간이며, K , K_i , K_d 는 제어이득이다. 샘플링 시간은 $1ms(1kHz)$ 이며 제어이득은 압전소자의 이력현상(hysteresis)과 구동봉과 접촉면 사이의 마찰에 의한 비선형성으로 액츄에이터의 모델링이 어렵기 때문에 해석적인 방법으로 제어이득을 얻을 수 없어서 시행착오법(trial & error)으로 선정하였다. 제어이득은 우선 작은 K 값을 주고 오버슈트(overshoot)가 생기지 않고 정상상태의 오차가 없도록 K_i , K_d 를 선정하였다. 그 다음으로 응답속도를 빠르게 하기 위하여 조금씩 K 값을 증가시키며 K_i , K_d 를 미세조정하여 응답속도가 가장 빠르고 정상상태의 오차가 없을 때의 제어이득을 선정하였다.

실험결과 $3ms$ 정도에서 목표포 하는 위치 $3\mu m$ 에 도달함을 볼 수 있다. $10ms$ 이후 미소한 변동(fluctuation)이 발생하였는데 이것은 $0.05\mu m$ 의 범위로 변위 측정장치의 최소 변위 분해능에 해당하므로 변위측정장치의 분해능의 한계 때문에 발생한 것으로 판단된다.

3.3 정밀 위치제어 실험

본 연구에서 개발한 액츄에이터는 두가지 방법으로 위치제어를 할 수 있다. 첫번째는 최대 스텝변위를 누적시켜가며 목표점(target position)까지 접근한 후에 목표점으로 부터 잔여 거리는 3.2절에서 보여준 PID제어를 사용한 미세구동으로 목표점에 도달하는 방법이다. (method I) Fig. 9는 위의 방법을 사용하여 위치제어 실험을 수행한 결과이다. 스텝구동의 주기는 $5ms$ 로 하였다. 또, 다른 방법은 처음의 방법과 유사하게 목표점 근방까지 접근한 후 스텝변위를 작게 하여 목표점에 도달할 때까지 미소변위를 축적하며 이동하는 방법이다. (method II) 이 경우 위치정밀도는 최종 스텝변위의 크기에 의하여 결정된다. 첫번째 방법에 의한 위치제어는 구동봉의 위치제환이 필요하나 두번째 방법은 단순히 큰 스텝변위와 미세 스텝변위를 누적하여 목표

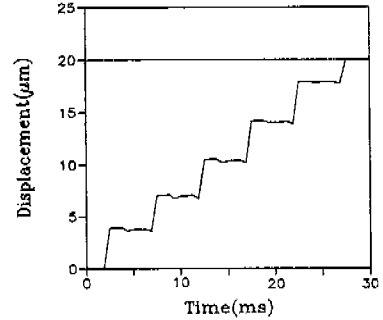


Fig. 9 Position control by method I (coarse step motion+PID control)

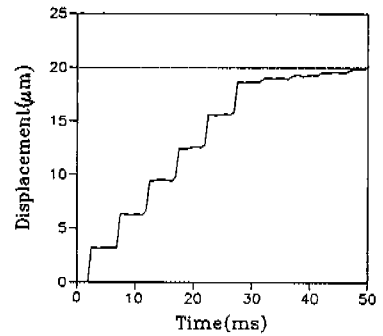


Fig. 10 Position control by method II (coarse step motion+fine step motion)

지점까지 이동하므로 위치제환이 필요하지 않다는 점이 다. 따라서 두번째 방법은 외부하중에 의하여 미끄러짐이 발생하였을 때 보정할 수 없는 단점이 있다. 그러나, 봉 선단의 위치를 감지하는 센서를 사용하면 원하는 위치로 이동시키는데 아무 문제가 없다. Fig. 10은 위의 방법으로 위치제어 실험을 수행한 결과이다.

4. 결론

3개의 적층형 압전소자의 순차적 구동을 이용하여 단위 이동거리를 임의로 조절할 수 있는 스텝변위 구동형의 액츄에이터를 개발하였다. 액츄에이터의 구동 위치정밀도는 $0.05\mu m$ 이하이며 이동거리에 제한이 없다. 액츄에이터의 이동은 최대 스텝변위를 누적시켜 목표지점 근방까지 이동하고 잔여거리는 단위 스텝변위를 임의로 조절하는 위치제환 방법과 최대 스텝변위와 최소 스텝변위를 누적시켜 임의의 위치에 도달하게 하는 개회로 제어 방법으로 구동이 가능하며 각각의 경우에 대한 이동

특성을 실험을 통하여 확인하였다.

후 기

본 연구는 1994년도 한국과학재단의 특정 목적기초 연구(과제번호 94-1400-09-01-3)의 일부로 수행되었으며, 동 재단의 관계자분께 감사드립니다.

참고문헌

1. S. C. Jacobsen, R. H. Price, J. E. Wood, T. H. Rytting, M. Rafaelof, "A Design Overview of an Eccentric-motion Electrostatic Microactuator," *Sensors and Actuators*, 20, pp.1-16, 1989.
2. M. Bergamasco, F. Salsedo, L. Ferretti, P. Dario, "SMA-Based Integrated Miniature Motor," *proc. of 1993 JSME Intern. Conf. on Advanced Mechatronics, Tokyo, JAPAN*, pp.493-498, Aug. 1993.
3. 김호기, 신병철, "압전 전왜 세라믹스," 반도체출판사, 1991.
4. S. Vieira, "The Behavior and Calibration of Some Piezoelectric Ceramics Used in the STM," *IBM J. Res. Develop.*, Vol.30, No.5, pp.553-556, 1986.
5. Tokin 社, "Technical Documents-Multilayer Piezoelectric Actuator," 4ed., Japan, 1990.
6. P. J. Blau, "ASM Handbook-Friction, Lubrication, and Wear Technology," *ASM International Handbook Committee*, Vol.18, pp.71, 1992.