

피에조의 인치웜 방식에 의한 미세 이송 기구

고태조(영남대 기계공학부), 김희술(영남대 기계공학부), *배영호(영남대 기계공학부 대학원)
서승희(영남대학부생), 김재건(영남대학부생), 김은한(영남대학부생)

T. J. Ko(Mech. Eng. Dept., YNU), H. S. Kim(Mech. Eng. Dept., YNU), Y. H. Bea(Mech. Eng. Dept., YNU)
S.H.Seo(Mech. Eng. Dept.,YNU), J. G. Kim(Mech. Eng. Dept., YNU), E.H.Kim(Mech. Eng. Dept., YNU)

Micro-feeding Mechanism By Inchworm Type of Piezoelectric ceramic

ABSTRACT

In this paper, a new type of inchworm motion actuator is introduced. This is consisted of two piezoelectric ceramics; one is for moving the slider, and the other is for clamping the slider in the guide way of the body. The linearity and positional accuracy of the system is good enough for the high precision motion. Since the system is more compact than the conventional system using three piezoelectric ceramics, it is applicable for the micro-machine or MEMS. However, the effort for reducing the vibration, velocity discrepancy in the motion direction, and compensating the hysteresis behavior is additionally needed.

Key Words : Piezoelectric ceramic (압전 소자), Inchworm (인치웜), Micro-feeding mechanism (미세이송기구)

1. 서론

현재 초소형 Positioner, Micro pump, 초소형 측정 기구 등의 MEMS 분야에서는 고정밀 위치 제어가 가능한 주구동원으로서 Piezo actuator를 적용시키기 위한 개발 작업이 한창이다. Piezo actuator는 압전 소자라고도 불리며 기계적 에너지와 전기적 에너지를 서로 양방향으로 변환을 일으킬 수 있는 것으로 구동기 및 센서로서 모두 사용될 수 있다.[1] 본 연구에서는 압전소자의 전압에 따른 변위를 이용하는 구동기로서의 메카니즘에 관해 논한다.

기존의 전기 유압식 등의 구동기와는 달리 압전 소자는 소형이면서 구동 분해능이 아주 높다는 특징을 가지고 있다. 또한, 압전소자의 신축이 atomic process 이므로 운동이 부드럽고 연속적이기 때문에 stick-slip 이 없으며 stainless steel 로 된 유사한 구조물에 비해 20% 이상의 초과 강성을 가진다. 따라서, 힘 발생력이 크고 구동 에너지(power)가 수 milli-watts 로 에너지 소비량이 적은 것으로 알려져 있다. 그러나 높은 변위 해상도와 빠른 주파수 응답을 가지고 있지만 비선형적이고, 큰 히스테리시스(hysteresis)가 존재하며 압전소자의 발생 변위가 최대 0.1% strain 으로 제한되기 때문에 다소 넓은 영역을 트래킹 할 필요가 있는 위치제어장치에 응용하는 것은 큰 문제점으로 남아있다.[2] 이에 대한 대책으로 최근 Piezo actuator 의 모션증폭 기구 또는 인치웜 메커니즘이 계속 개발되고 있는 실정이다. 본 논문에서는 고정밀 분해능을 얻을 수

있으며 이송범위의 제한을 받지 않는 새로운 형태의 인치웜 메커니즘을 제안한다. 이것은 초소형, 고정밀 위치 제어를 위해 압전소자 두개의 인장과 수축을 타임 스케줄에 따라 조합한 미세 이송 기구(인치웜 기구)이다. 이 시스템에 대하여 마이크로 센서를 이용한 피드백 제어를 적용하여 μm 단위 이하의 위치 정밀도를 실험을 통해 검증하고자 한다.

2. 인치웜 방식의 구동 원리 및 구조

2.1 인치웜 구동 원리

인치웜 장치의 전, 후 방향에 대한 구동원리를 Fig.1(a)와 Fig.1(b)에서 나타내었으며 Fig. 2에서 제어신호를 도식화하였다. 가이드 내의 슬라이드는 고정부와 구동부로 나뉘어지며 서로 탄성 힌지로서 연결되어있다. 두 개의 압전소자에 순차적인 변위 발생을 위해 타임 스케줄에 따른 두개의 입력신호를 사용했으며 단위 사이클당 구동원리는 4개의 과정으로 구성된다. 초기 상태에서 고정부의 압전소자가 전압을 받아 변위가 발생하고 이로 인해 슬라이드가 양 가이드 사이에 클램핑된다. 다음 단계에서 구동부의 압전소자가 팽창한다. 그리고, 고정부의 압전소자가 수축한 후, 구동부의 압전소자가 수축함으로써 결과적으로 초기 상태에서 일정변위 만큼의 이송이 진행되는 것이다.

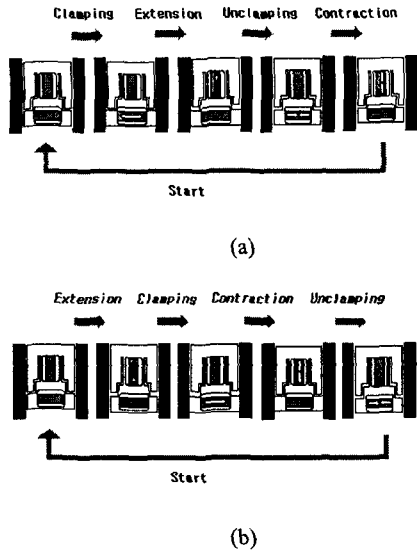


Fig. 1 Cycle of inchworm motion ; (a)Forward, (b)Backward

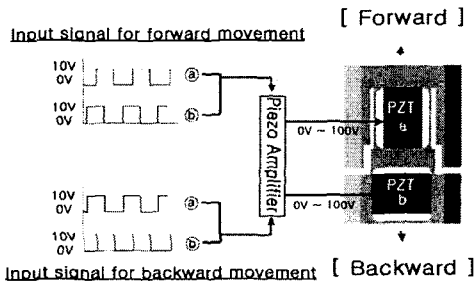


Fig. 2 Signals of two Piezoelectric elements for inchworm motion

실험에 쓰여진 Piezo actuator 는 독일 PI 社 제품 (P-802.00) 으로 제반 사항은 Table 1 [2]에 기술하였으 며, 슬라이드 재질은 연성이 큰 황동을, 가이드는 SM 45C 를 사용하였다.

Item	Specification
Open loop travel @ 0 to 100V	6 $\mu\text{m} \pm 20\%$
Open loop resolution	0.06 μm
Stiffness	200 N / μm
Force generation(blocked)	1200 N $\pm 20\%$
Push/pull force capacity	1000/5 N
Dimensions	6 \times 6 \times 9 mm \pm 0.5

Table. 1 Properties of P-802.00 from PI

2.2 탄성 힌지 메카니즘

압전소자에 전압을 가하면 압전소자의 길이 방향으로 미소변위가 발생한다. 이러한 미소 변위는 힌지 스프링으로 고정부에 연결된 구동부에 전달되어 슬라이드의 미세 이송을 발생시키며, Fig. 3 과 같이 힌지 스프링을 좌우 대칭으로 설계함으로써 압전소자의 변위가 슬라이드 이송 방향에 적합한 구조와 조건을 가지게 하였다. 따라서 슬라이드의 길이 방향으로만 변위가 발생 하도록 하였다. 압전소자에 의해 변형된 슬라이드의 형상을 예측하고 또한 적절하게 구동 될 수 있는가를 확인하기 위해 상용 해석 program 인 ANSYS 5.7 를 사용하여 100 N/ μm 의 값을 가지도록 탄성힌지를 설계하였다. Fig. 4 는 이 때의 변위를 해석한 결과로서 구동부의 압전소자가 6 μm 늘어났을 때 슬라이드의 변형 모습이다.

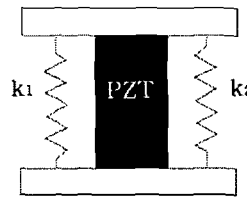


Fig. 3 Free body diagram of slider and Piezo

압전소자에 의해 발생되는 변위는 탄성힌지의 복원력에 의한 변위만큼 수축한다. 탄성힌지에 의한 실제 압전소자 변위는 아래 식(1)을 따른다.

$$K_s \cdot D_x = K_p \cdot (D_{\text{max}} - D_x) \quad (1)$$

$$D_x = D_{\text{max}} \cdot (K_p / (K_p + K_s))$$

여기서 힌지 강성 $K_s = 2K_1$ 이며 압전소자의 강성은 K_p , 외부하중이 없을 때의 압전소자 최대변위 D_{max} , 탄성힌지에 의한 변위손실을 D_x 로 나타낸다.

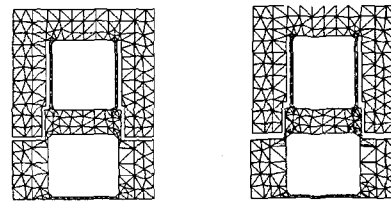
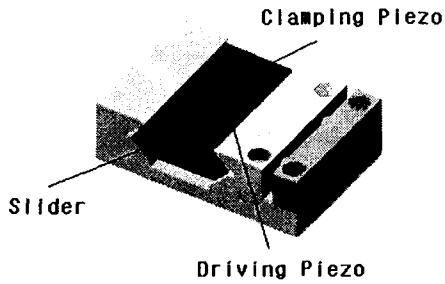


Fig. 4 Finite element analysis of the mechanism with flexure hinges

2.3 이송기구의 구조

본 논문의 미세 이송 기구의 외형도를 3D 모델링 프로그램인 CATIA V5R7 로 나타낸 것이 Fig 5 이다. 가이드에 슬라이드를 조립하여 구동성을 확인

하였으나 가이드와 슬라이드의 간격 조절에 상당한 어려움이 존재하였다. 이를 개선하기 위해 가이드와 슬라이드의 마찰면의 래핑 작업과 가이드를 분리형으로 설계하여 일정한 결합력을 줄 수 있는 스프링 볼트를 사용하여 둘 사이의 간극이 1 μm 이내가 되도록 하였다.



Size : 41mm(W)× 27mm(D)× 12mm(H)

Fig. 5 Modeling of micro inchworm apparatus

3. 구동 특성 실험 및 해석

3.1 장치 구성도

전체적인 장치의 구성도는 Fig. 6 에 나타내었다. 구동 신호는 진동특성 등을 고려하여 여러 형태의 입력신호를 사용할 수 있으나, 본 연구에서는 간단히 사각 펄스신호를 사용했다. 이 신호는 D/A board(Advantech 社, PCI-1720)를 통해 High Voltage Amplifier(Techmack 社)로 증폭된 후 압전소자에 인가된다. 슬라이드의 이동량은 Gap sensor (Bently Nevada 社, 127 $\mu\text{m}/\text{V}$) 로 측정하였고, 여기서 나오는 위치정보를 A/D board(Darim 8330)를 통해 PC(Pentium III-550Mhz)에서 Feedback 신호로 사용했다. 구동신호 발생과 Feedback 에 필요한 프로그램은 'Visual C++ 6' 로 작성하였다.

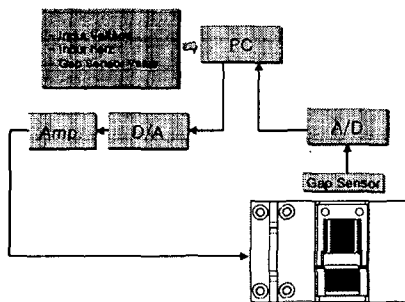


Fig. 6 Schematic diagram of micro translation

3.2 이송기구의 구동특성평가

Input voltage 에 따른 슬라이드 구동부위 변위 측정을 위해 각각의 입력 전압과 구동 파형을 일정 시간동안 압전소자에 인가하여 그 결과를 Fig. 7 에 도출하였다. 입력 전압은 30V 부터 100V 까지 10 Hz 를 인가했을 때의 슬라이드 구동부위 변위 발생을 측정하였다. 아래 도표에서 보듯이 입력 전압에 따른 구동부위 발생 변위가 96%의 선형성을 가진다.

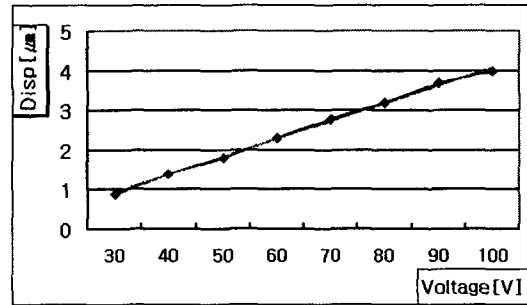


Fig. 7 Slider displacement according to input voltage

3.3 이송기구의 속도 실험

Fig. 8 은 각각의 입력 전압에 따른 슬라이드의 속도를 나타낸다. 각각 100Hz 의 같은 조건에서 사용 압전소자의 최대 허용 전압인 100V 이하의 전압을 인가하여 정방향, 역방향의 이송 속도를 비교 분석한 것이다. 그 결과 입력전압이 증가할수록 속도의 방향 오차가 증가함을 알 수 있다.

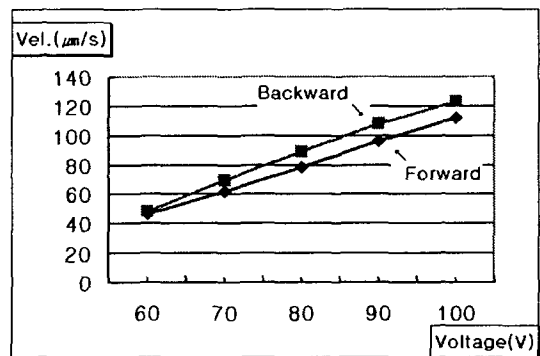


Fig. 8 Slider velocity according to input voltage

Fig. 9 는 같은 입력 전압을 주면서 입력 주파수를 달리하여 정방향, 역방향의 이송 속도를 분석한 그래프이다. 그래프에서 알 수 있듯이 이송 속도는 입력 주파수의 변화보다도 입력 전압의 차이에 의해 보다 큰 방향오차(backlash)를 보여준다.

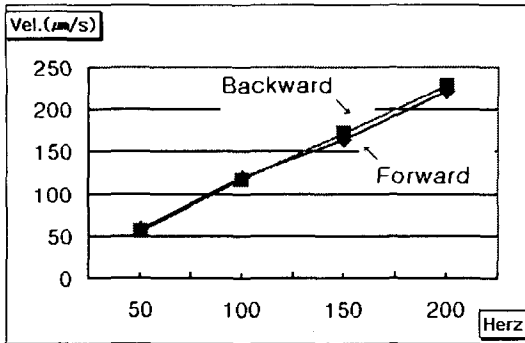


Fig. 9 Slider velocity according to input frequency

3.4 Feedback 실험

Fig. 10 은 Gap 센서를 이용하여 Feedback 제어를 했을 때의 슬라이드의 구동특성을 보인 것이다. 실험 조건은 동일한 입력 주파수 100Hz 일 때의 입력 전압을 60 -100 V로 하여 정방향 역방향 3 회 반복 이송시켜 그 결과를 도표에 나타내었다. Fig. 11 은 이 때의 위치오차 결과를 나타낸다. 도표에서 보듯이 슬라이드의 구동은 선형적이고, 입력전압에 따라 속도차이가 현저하게 나타남을 알 수 있다. 또한, 이 시스템의 Feedback 신호에 따른 구동에서 평균 위치오차가 1.43 μm로 나타났다.

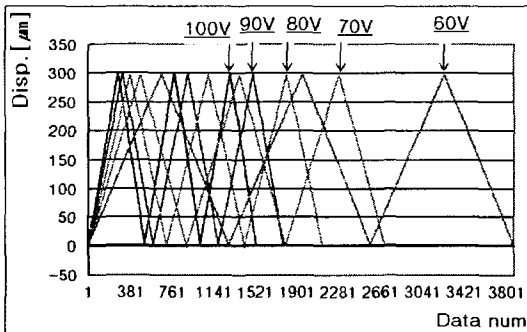


Fig. 10 The feedback test of each voltage

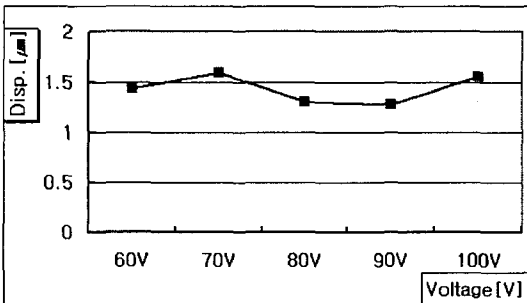


Fig. 11 The position error of the slider

4. 결론

본 논문에서는 두 개의 압전소자를 이용한 인치웜 구동방식의 고정밀 이송기구를 제안하였다. 이송기구의 기본적인 성능 실험을 수행한 결과 입력 전압에 의해 선형적인 변위와 속도의 분포를 보임을 알 수 있었으며 입력 전압에 따라 정방향과 역방향의 속도가 달라지는 Hysteresis 특성을 고찰하였다. 이 시스템에서 Feedback 을 시켰을 경우에는 이송 정밀도가 1.43 μm 로 나타났다. 따라서, 제시된 이송기구는 전압의 크기와 입력 주파수를 조정함으로써 이송거리와 위치 정밀도를 향상시킬 수 있는 특성을 가지고 있기 때문에, 향후 보다 빠른 이송과 정밀한 위치 이송 능력을 부여하기 위한 Feedback 제어를 적용하여 이를 정밀 가공분야에 응용가능토록 개선할 계획이다.

참고문헌

1. 박창엽, "전지전자용 압전세라믹스"; pp. 174-161, 1995
2. PI 社. "Nanopositioning", pp. 1.6, 4.24-25, 1998
3. J. M. Paros and L. Weisbord, "How to Design Flexure Hinges," Machine Design, pp 151-156, Nov., 1965
4. 김인수, 이홍식, 송준엽, "이송자벌레로의 압전세라믹 작동기 응용", 한국정밀공학회 지 제 18 권 8 호, pp. 157-163, 2001.
5. Z. X. Wang, K. Jouaneh and D. Dornfield, "Desige and characterization of a linear motion Piesoelectric microactuator", IEEE Conf. Robotics and Automarion, pp. 1710-1715, 1989
6. S. Sakuta, K Okawa, K Ueda, Experimental studies on ultra-precision positioning "an inchworm movement method using fine and coarse positionings" int. J. Japan Soc. Prec Eng. 27, pp 235-240, 1993