

마이크로 프레스용 고하중/대변위 액추에이터 개발

김병희*, 남권선+, 최종필+, 김현영++, 이낙규+++

Development of High Load/Large Displacement Actuator for Micro-press

B. H. KIM*, K. S. NAM+, J. P. CHOI+, H. Y. KIM++ , N. K. LEE+++

Abstract

In this paper, a new type of inchworm motion actuator is developed in fabrication of actuators for micro-press machine. This is consisted of three piezoelectric actuators, one is for moving the tool guide and the other are for clamping the guide. The inchworm motor provides both high load and large displacement in small size actuator. PZT has compressive strength and often fails under tensile stress and pulling. Thus, in order to prevent failure, we have designed pre-load housing and accomplished FEM analysis. The pre-load housing was used for determining the optimal design condition by comparing the von-mises stresses with the change of hinge stiffness. Also, in order to predict the performance of the motor under certain conditions, the system model was simulated using MATLAB. This is open loop control actuator and driven by the period of input voltage.

Key Words : Piezoelectric actuator , Inchworm , FEM , Pre-load housing , Hinge

1. 서론

최근 MEMS(micro electro mechanical system)의 급속한 발전으로 인하여 기기 또는 유닛의 마이크로화가 이루어졌다. 하지만 기존의 생산라인은 마이크로 단위의 부품을 가공하기에는 많은 면에서 비합리적이고 경제적으로 불리한 단점을 지니고 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해 대두된 것이 마이크로 팩토리이다[1].

마이크로 팩토리의 실현을 위해서는 기존의 가공기 및 생산라인의 축소가 불가피하기 때문에 소형 구동기의 요

구 및 수요가 급증하고 있다. 현재 Ultrasonic Motor, BLDC, Voice Coil Motor, PZT 등 많은 종류의 소형 구동기가 개발되고 있으나, 큰 출력 토크와 대 변위를 동시에 만족시키는 구동기는 찾아보기 힘든 실정이다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 새로운 방식의 소형 구동기 개발과 관련된 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 논문에서는 마이크로 팩토리 구현을 위한 마이크로 프레스의 개발을 목표로, 이를 위한 고 하중/대 변위의 소형구동기의 제작에 필요한 시스템 설계와 정적·동적 해석을 통한 시스템의 안정화를 수행하였다.

* 발표자, 강원대학교 기계메카트로닉스 공학부 (kbh@kangwon.ac.kr)

주소: 200-701 강원도 춘천시 효자2동 강원대학교 공과대학 6호관 111호 정밀가공 연구실

+ 강원대학교 기계메카트로닉스 공학과

++ 강원대학교 기계메카트로닉스 공학부

+++ 한국생산기술연구원 디지털 생산공정팀

2. PZT에 의한 인치웜 모터 구동

PZT의 가장 큰 특징은 압전효과로 재료의 결정판에 일정한 방향에서 압력을 가하면 판의 양면에 압력에 비례하여 한 면은 (+), 반대 면은 (-)의 전기가 나타나 전압이 발생한다. 이러한 현상을 압전 직접효과라 하며, 반대로 재료에 전압을 인가하면 변형이 일어나는 현상을 압전 역효과라 한다.

기존의 인치웜 모터들은 X-Y 축 스테이지에 사용되어 정밀이송 및 위치제어가 주된 목적이었기 때문에 Z축에 사용하여 큰 출력 힘을 낼 수 있는 인치웜 모터의 개발은 미흡하였다. 이를 보완하기 위해 새로운 방식의 인치웜 모터를 고안하였다[2~3]. 일반적인 인치웜 모터는 가이드를 따라 구동기가 직접 움직이는 방식이지만 본 연구의 구동기는 Z축에 고정되어 있고 툴 가이드가 움직이는 방식을 이용하였다[4]. Fig. 1은 클램핑 액츄에이터와 익스텐더 액츄에이터의 반복적 동작을 통한 Z축의 변위를 발생시키는 인치웜 모터의 구동 원리를 보여준다.

3. 인치웜 모터 모델링

3.1 운동방정식

Fig. 2 (a)는 인치웜 모터의 개념도이고, Fig. 2 (b)는 인치웜 모터의 FBD(free body diagram)를 보여 준다.

Fig. 2의 운동방정식을 구하면 다음과 같다.

$$m_1 \ddot{x}_1 = Mg - k_{ext}(x_2 - x_1) - F_{PZT} - F_{fric1} \quad (1)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 = Mg + k_{ext}(x_2 - x_1) + F_{PZT} - F_{fric2} \quad (2)$$

$$M \ddot{y} = F_{fric2} - P \quad (3)$$

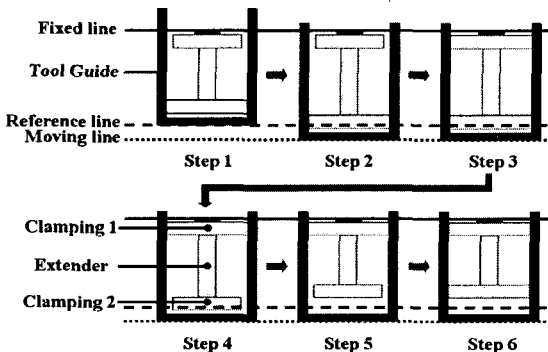
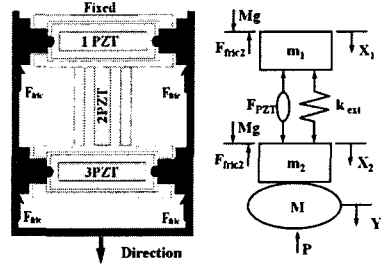


Fig. 1 Actuation of inchworm motor



(a) Schematic (b) Free Body Diagram
Fig. 2. Inchworm motor modeling

여기서 m_1 은 클램핑1에 걸리는 질량, m_2 는 클램핑2에 걸리는 질량, M 은 툴 가이드 질량, X_1 은 클램핑1의 이송량, X_2 는 클램핑2의 이송량, F_{PZT} 는 익스텐더의 출력 힘, F_{fric} 는 툴 가이드와 클램핑의 마찰력, Y 는 툴 가이드의 이송량, k_{ext} 는 익스텐더의 강성, P 는 프레스 성형시 발생하는 부재와의 반력이다.

인치웜 모터의 정적, 동적 구동 시 F_{fric} 는 마찰계수 μ 의 차이로 인하여 서로 다르게 나타난다. 시스템 구동시 마찰계수는 액츄에이터의 구동에 중요한 영향을 미치며, 마찰계수를 높임으로써 익스텐더의 팽창 시 툴 가이드와 클램핑 사이의 미끄러움을 방지할 수 있다. 다음 식은 정적 마찰계수(μ_s), 동적 마찰계수(μ_k)에 따른 마찰력을 나타낸다.

$$\begin{aligned} F_{Sfric} &= F_{Clamp} \times \mu_s \\ F_{Kfric} &= F_{Clamp} \times \mu_k, \quad F_{Sfric} > F_{Kfric} \end{aligned} \quad (4)$$

F_{Sfric} 는 정적 마찰력, F_{Kfric} 는 동적 마찰력, F_{Clamp} 는 PZT에 전압을 인가하였을 때 클램핑에서 발생하는 힘을 나타낸다. F_{Clamp} 는 질량이 PZT에 축 방향으로 올려 있을 때와 외부 스프링에 의해 구속 되었을 때 발생하는 힘은 차이가 있다. 스프링력이 작용하지 않을 때의 ΔL_0 는 PZT의 최대 변위를 나타내고 ΔL 는 스프링력에 의해 발생하는 변위를 나타낸다 ($\Delta L_0 > \Delta L$). 따라서 외부의 스프링력에 의해 발생하는 최대의 힘은 다음과 같다. k_s 는 외부 스프링이 가지는 강성이다.

$$\Delta L = \Delta L_0 \left(\frac{k_t}{k_t + k_s} \right) \quad (5)$$

$$F_{PZT} = k_t \times \Delta L_0 \left(\frac{k_t}{k_t + k_s} \right) = k_t \times \Delta L$$

k_t 는 PZT 액츄에이터 고유의 강성이며, 익스텐더의 변위량

은 X_2 - X_1 이 된다. 따라서 위의 식(1)-(5)들을 정리하면

$$m_1 \ddot{x}_1 = Mg - (k + k_i)x_2 + (k + k_i)x_1 - k_{C1} \Delta L \times \mu \quad (6)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 = Mg - (k + k_i)x_1 + (k + k_i)x_2 - k_{C2} \Delta L \times \mu \quad (7)$$

$$\dot{M} \dot{y} = k_{C2} \Delta L \times \mu - P \quad (8)$$

과 같이 된다. 위 식에서 ΔL 은 클램핑의 X축 방향의 최대 변위이고, k_{C2} 는 클램핑 PZT의 강성이다.

4. 결과 및 고찰

4.1 예압량 선정

PZT 액츄에이터는 인장과 전단력에 약하다는 기계적 취약점을 가지고 있다. 이를 보완하기 위해 PZT에 항상 예압을 가해줘야 하며, 예압을 가함으로써 변위의 신뢰성도 향상시킬 수 있다. PZT는 외부에서 힘을 받게 되면 그만큼 압축되어 PZT의 길이가 줄어든다. 따라서 예압량 선정은 PZT 구동기 설계에 있어서 중요한 인자가 된다. 스프링(k_s)으로 예압을 걸어주면 스프링력에 의해 실제적으로 일어나는 변위는 줄어든다. 따라서 줄어드는 변위는 최소화하고 출력힘은 최대로 하기 위하여 적절한 예압 하우징의 설계가 필요하다. 식 (5)를 이용하여 6000N의 출력 힘과 30 μ m의 변위를 갖도록, 클램핑은 k_s 를 18N/ μ m 선정하고 익스텐더는 k_s 를 24N/ μ m 선정하였다. 하우징의 재료는 탄성계수가 6.89×10^{10} N/m²인 두랄루민(alloy6061-T6)를 사용하였다. 또한 힌지구조를 사용함으로써 변형을 용이하게 하여 변위의 제약성을 피하였다.

Fig. 3은 제작한 예압 하우징의 실물과 FEM 해석을 통한 최대응력 나타낸다. 또한 Table 1은 두랄루민의 물성치를 나타낸다. 가장 큰 응력을 받는 부분이 1.118×10^8 N/m²으로 항복응력 아래에 있게 된다. 따라서 하우징의 변형 시 발생할 수 있는 크랙 등 기계적 훼손으로부터 안전하다는 것을 알 수 있다.

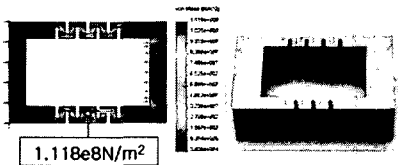


Fig. 3. FEM of Von Mises and pre-load housing picture

Table 1 Alloy6061-T6 property

Item	Unit	Constant
Young's modulus	N/m ²	6.89×10^{10}
Poisson ratio	-	0.33
Shear modulus	N/m ²	2.60×10^{10}
Tensile stress	N/m ²	2.76×10^8
Yield stress	N/m ²	3.10×10^8
Density	Kg/m ³	2768

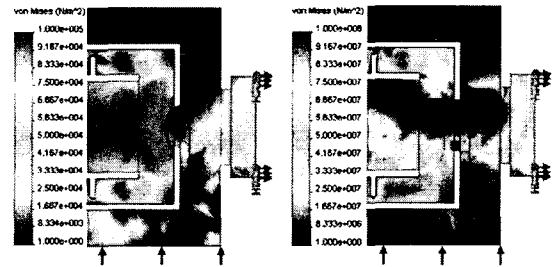


Fig. 4. FEM comparison of ball contact(left) and cylinder contact type(right)

4.2 전단력 저감을 위한 설계 및 해석

Fig. 4는 압력의 발생 시 PZT에 미치는 전단력 및 응력의 영향을 FEM 해석을 통해서 나온 결과이다. Fig. 4 왼쪽은 예압 하우징과 클램프 사이에 세라믹 볼을 넣어 점접촉을 구현하였다. PZT에 전해지는 응력이 최대 2.000×10^4 N/m²이고, Fig. 4의 오른쪽은 예압 하우징과 클램프가 실린더접촉으로 인하여 PZT에 전해지는 응력이 최대 3.000×10^8 N/m²이다. Fig. 4의 왼쪽과 같이 볼의 점접촉으로 인하여 액츄에이터의 구동 시 클램프에 의해서 발생한 전단력과 모멘트는 PZT에 축방향으로만 전달되는 특성을 보였다. 이로 인해 세라믹 볼을 사용하여 PZT의 파손을 막는 역할을 한다.

4.3 시스템 구성

Fig. 5는 본 연구에 사용된 장비와 시스템 구성도이다. 전체적인 시스템은 개루프 제어 방식으로 PC의 프린터포트에서 나오는 0~5V를 전압증폭기를 통해 0~1000V의 출력전압을 발생시킨다. 이 전압이 PZT 액츄에이터에 인가되어 인치 워엄 모터가 구동된다.

4.4 변위 측정 및 작동 온도 측정

Fig. 6은 예압이 주어지지 않았을 때 각각의 PZT의 변위

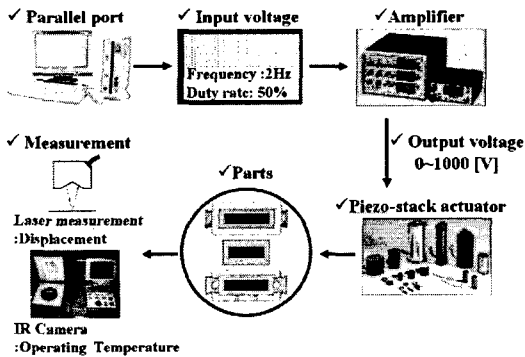


Fig. 5. Schematic of system

를 측정한다. 클램핑1에 사용되는 PZT의 평균 이송량은 76.57 μm , 클램핑2는 74.68 μm , 익스텐더는 55.6 μm 의 변위를 보였다. 제품의 사양에 나와 있는 최대 변위인 80 μm 와 60 μm 에는 약 -5 μm 오차를 확인 할 수 있었다. 따라서 예압 하우징 설계시 각각의 PZT의 특성에 따른 강성 k_s 를 고려하여야 한다. PZT는 분극처리를 통해서 만들어지며, PZT의 특성 상 퀴리온도(300 $^{\circ}\text{C}$) 이상이 되면 분극현상이 소멸된다. 인치웜 모터의 경우 액추에이터의 구동 시 마찰력과 압축에 의하여 열이 발생하게 되므로, 열에 의한 시스템 손상을 방지하여야 한다. Fig. 7은 PZT 구동 시 발생하는 열 발생을 관찰하였다. 예압이 없는 상태에서 5Hz의 구동 주파수로 80분 동안 측정한 결과 끝단을 제외하곤 모두 2 $^{\circ}\text{C}$ 의 온도 상승을 보였다.

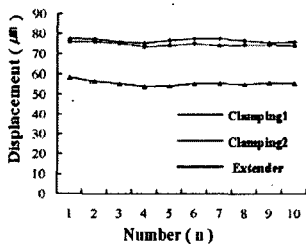


Fig. 6. Displacements of PZT actuators

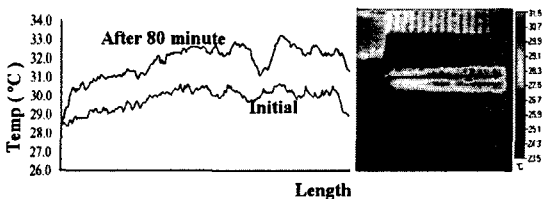


Fig. 7. Temperature variation during actuation of PZT

5. 결론

본 연구에서는 고하중/대변위의 특성을 가지는 마이크로 프레스용 액추에이터의 개발을 위해 인치웜 타입의 리니어 모터를 고안하였으며, 시스템 모델링을 통하여 정적·동적 구동 특성의 파악 및 시스템 안정도를 확인하였다. 또한 PZT의 구동 시 발생할 수 있는 전단력과 모멘트에 의한 PZT의 파손 문제를 개선하였다. 향후 인치웜 모터의 구동 시 발생할 수 있는 문제점을 찾아내고 특성파악을 통해 힌지구조의 예압 하우징을 설계하여 보완하여야 할 것이다. 또한 예압 하우징과 클램프 사이의 세라믹 볼에 걸리는 응력을 줄이는 방법에 대하여 연구를 수행할 것이다.

후기

본 연구는 산업자원부가 지원하고 있는 차세대 신기술 개발 사업 중 한국기계연구원이 주관하고 있는 “차세대 마이크로 팩토리 시스템 기술 개발 사업”의 세부과제로서 수행 중이며 이에 관계자 여러분들에게 감사의 말씀을 올립니다.

참고 문헌

- (1) E Kussul, T Baidyk, L Ruiz-Huerta, A Caballero-Ruiz, G Velasco and L Kasatkina, 2002, 12, "Development of Micromachine Tool Prototypes for Microfactories", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, pp. 795~812.
- (2) Yung-Tien Liu, Rong-Fong Fung, Tai-Kun Huang, 2004, "Dynamic Responses of a Precision Positioning Table Impacted by a Soft-mounted Piezoelectric Actuator", *Precision Engineering* 28, pp. 252~260.
- (3) Han J. M. T. A Adriaens, Willem L. de Koning, and Reinder Banning, 2000, "Modeling piezoelectric Actuators", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 5, No. 4.
- (4) J.Park, S. Keller, G. P. Carman, H. T. Hahn, 2001, "Development of a Compact Displacement Accumulation Actuator Device for both Large Force and Large Displacement", *Sensors and Actuator A* 90, pp. 191~202.