

# 인치웜모터를 이용한 마이크로 프레스용 고정밀 구동기의 개발

최종필\*, 남권선\*, 이해진<sup>+</sup>, 이낙규<sup>+</sup>, 김병희<sup>++</sup>  
(논문접수일 2008. 7. 23, 심사완료일 2009. 1. 26)

## Development of High Precision Actuator for Micro Press System by Inchworm Motor

JongPil Choi\*, KwangSun Nam\*, Hye-Jin Lee<sup>+</sup>, Nak-Gue Lee<sup>+</sup>, ByeongHee Kim<sup>++</sup>

### Abstract

This paper presents the fabrication of inchworm motor for high precision actuator system of large displacement and high force. The inchworm motor consists of a extend actuator that provides displacement of tool guide and two clamping actuators which provide the holding force. In order to avoid the PZT fracture, design of pre-load housing was conducted by flexure hinge structure, because PZT actuator has low tensile and shear. To design the pre-load housing and optimize the clamping mechanism, the static and dynamic analysis were conducted by finite element method. From these results, a prototype of the inchworm motor was fabricated and dynamic characteristic with respect to the various frequency was tested. The maximum velocity of the inchworm motor was 41.1 $\mu$ m/s at 16Hz.

**Key Words** : Inchworm motor(인치웜모터), Piezoelectric actuators(압전 액츄에이터), Pre-load(예압), FEM(Finite Element Method)  
(유한요소법)

## 1. 서론

최근 MEMS(micro electro mechanical system)의 급속한 발전으로 인하여 기기 또는 유닛의 마이크로화가 이루어지고 있다. 하지만 기존의 생산라인은 마이크로 단위의 부품을 가공하기에는 많은 면에서 비합리적이고 경제적으로 불리한 단점을 지니고 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해 대두된 것이 마이크로팩토리이다<sup>(1,2)</sup>.

마이크로팩토리의 실현을 위해서는 기존의 가공기 및 생산 라인의 축소가 불가피하며, 이를 구현하기 위하여 소형 구동기의 요구 및 수요가 급증하고 있다. 현재 초음파 모터, BLDC, 보이스코일, PZT 액츄에이터 등 많은 종류의 소형 구동기가 개발되고 있으나, 큰 출력 토크와 대변위를 동시에 만족시키는 구동기를 찾아보기 힘든 실정이다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 새로운 방식의 소형 구동기 개발과 관련된 연구가 활발히 진행되고 있다.

\* 강원대학교 기계메카트로닉스공학과 대학원  
+ 한국생산기술연구원 디지털 성형공정팀 연구원  
++ 교신저자, 강원대학교 기계메카트로닉스공학부 (kbb@kangwon.ac.kr)  
주소: 강원도 춘천시 효자2동 강원대학교길1 192-1

본 논문에서는 마이크로팩토리 구현을 위하여, 마이크로 프레스 시스템용 고하중/대변위 구현을 위한 인치웜모터를 제안하였다. 이러한 인치웜모터는 PZT 액츄에이터를 사용하여 구동되어지며, 기존 소형 구동 시스템의 문제점을 극복할 수 있도록 설계 및 정적·동적 해석을 통한 시스템 안정화를 수행하였다. 이러한 과정을 통해 인치웜모터를 제작하였으며, 구동특성을 파악하였다.

## 2. PZT를 이용한 인치웜모터

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 기계적 에너지를 전기적 에너지로 변환시키는 현상을 압전직접효과(piezoelectric direct effect)라 하며, 반대로 재료에 전압을 인가하면 변형이 일어나는 현상을 압전역효과(piezoelectric converse effect)라 한다<sup>(3,4)</sup>. 특히 PZT는 전압 인가 시 사이즈 대비 고출력(>10000N) 및 고정밀도를 가진다는 장점을 가지고 있지만, 수십 마이크로미터의 변위 한계성을 가지고 있다. 따라서 이러한 변위 한계성을 극복하고 소형의 고하중/대변위의 액츄에이터를 구현하기 위해 인치웜모터가 개발되고 실용화되고 있다. 하지만 기존의 인치웜모터는 주로 스테이지에 사용되었기 때문에 고분해능의 위치 제어가 주된 목적이었으며 고하중을 요하는 분야에 사용되는 인치웜모터에 관한 연구는 아직 미흡한 실정이다<sup>(5-7)</sup>.

본 논문에서는 마이크로 프레스용 Z축 액츄에이터로 인치웜모터를 사용하기 위해, 소형 및 대변위/고하중의 출력력을 발생시킬 수 있는 새로운 형태의 인치웜모터에 관한 연구를 수행하였다. 일반적인 인치웜모터의 경우, 가이드를 따라 구동기가 직접 움직이는 방식이지만<sup>(8)</sup> 본 논문의 인치웜모터는 Z축에 고정되어 있으며 인치웜모터의 구동에 의해 톨 가이드가 움직이는 구동방식이 적용되었다.

Fig. 1은 인치웜모터의 구동 원리를 보여주고 있다. 먼저 1단계에서 클램프(clamp) 1에 전압이 인가되면 PZT의 팽창으로 톨 가이드를 잡게 되고, 2단계에서 익스텐더(extender)가 팽창하여 익스텐더의 변위만큼 톨 가이드를 이송시킨다. 3단계에서는 클램프 2가 팽창하여 톨 가이드를 잡고 4단계에서는 클램프 1이 수축하게 된다. 5단계에서는 익스텐더가 수축하여 초기 위치로 돌아가며, 6단계에서는 다시 클램프 1이 팽창하게 된다. 이러한 6단계의 반복 구동으로 톨 가이드의 대변위 이송이 가능해진다.

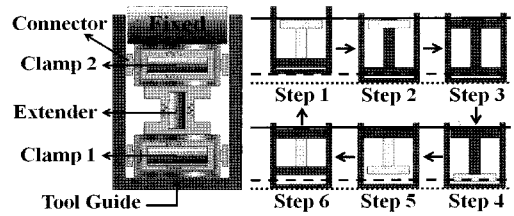


Fig. 1 Operation principle of inchworm motor

## 3. 인치웜모터의 설계 및 유한요소 해석

### 3.1 예압량 선정

PZT 액츄에이터는 전극과 세라믹을 적층하여 만들었기 때문에 인장과 전단력에 매우 약하다는 취약점을 가지고 있다. 이를 보완하기 위해 PZT에 항상 예압을 가해주어야 하며, 예압을 가함으로써 PZT 고유의 히스테리시스 특성도 줄일 수 있어 PZT의 변위 신뢰성 또한 향상시킬 수 있다. 따라서 예압량 선정은 PZT를 이용한 액츄에이터의 설계에 있어서 가장 중요한 인자 중 하나라 할 수 있다. 단순한 스프링( $k_s$ )에 의한 예압 시 스프링의 변위로 인해 실제 변위가 줄어들기 때문에 손실 변위를 최소화하고 출력힘은 최대로 하기 위하여 적절한 예압하우징(pre-load housing)의 설계가 중요하게 된다.

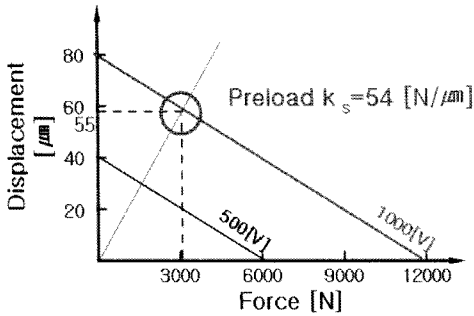
PZT 액츄에이터는 축 방향으로 외부 하중의 영향을 받을 때 발생하는 힘과 외부 스프링에 의해 구속 되었을 때 발생하는 힘은 차이가 존재하게 된다<sup>(9)</sup>. 스프링력이 작용하지 않을 때의  $\Delta L_0$ 는 PZT의 최대 변위를 나타내고  $\Delta L$ 은 스프링력에 의해 발생하는 변위를 나타낸다( $\Delta L_0 > \Delta L$ ). 따라서 외부의 스프링력에 의해 발생하는 최대의 힘은 다음과 같다.

$$\Delta L = \Delta L_0 \left( \frac{k_t}{k_t + k_s} \right) \quad (1)$$

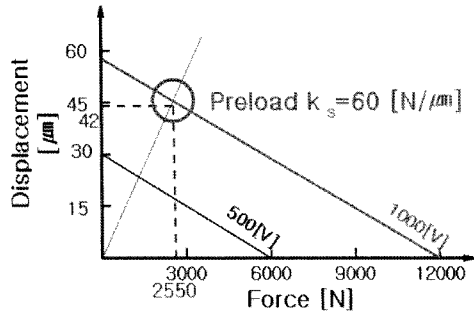
$$F_{PZT} = k_t \times \Delta L_0 \left( 1 - \frac{k_t}{k_t + k_s} \right) \quad (2)$$

이때,  $k_t$ 는 PZT 액츄에이터 고유의 강성이며,  $k_s$ 는 외부 스프링의 강성이다.

Fig. 3은 클램프의 예압하우징과 익스텐더의 예압하우징의 강성에 따른 출력힘과 발생 변위의 관계를 나타낸 그래프이다. 예압하우징은 외부 스프링과 같은 역할을 수행하기 때문에 강성에 따라 출력힘과 발생 변위가 변하게 된다. 식 (1)과 (2)를 이용하여 클램프 1, 2와 톨 가이드 사이에 충분한 마찰

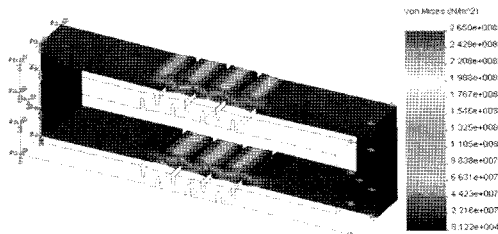


(a) Clamp1,2

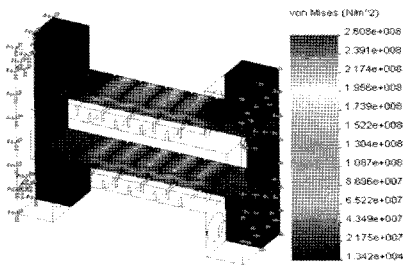


(b) Extender

Fig. 3 Blocking force and displacement of PZT with respect to stiffness of pre-load housing



(a) Clamp pre-load housing



(b) Extender pre-load housing

Fig. 4 FEM results of pre-load housing

Table 1 Specifications of PZTs

Specification	Description	
	extender	clamp 1,2
Displacement	55 $\mu\text{m}$	80 $\mu\text{m}$
Length	36mm	54mm
Blocking force	12000N	12000N
Capacitance	720 $\mu\text{F}$	540 $\mu\text{F}$

력을 얻기 위하여 3000N의 출력힘과 55 $\mu\text{m}$ 의 변위를 갖도록  $k_s$ 를 54.5N/ $\mu\text{m}$ 로 선정하고 익스텐더는 프레스의 역할을 수행하기 위해 2550N의 출력힘과 42 $\mu\text{m}$ 의 변위를 갖도록  $k_s$ 를 60N/ $\mu\text{m}$ 로 선정하였다. 이때, 익스텐더의 출력힘이 클램프의 마찰력보다 크게 되면 프레스 공정도중 슬립현상이 발생하기 때문에 클램프의 마찰력이 더 크도록 출력힘을 설계하였다. 이러한 예압하우징은 유연힌지구조(flexure hinge structure)를 사용하여 설계 및 제작을 수행하였다. Table 1은 본 논문에 사용된 PZT 액추에이터의 사양을 보여주고 있다.

Fig. 4는 위에서 고려한 사항들에 의해 설계된 클램프 예압하우징과 익스텐더 예압하우징의 외형과 FEM 해석 결과를 보여주고 있다. FEM 해석에 있어, 클램프 예압하우징과 익스텐더 예압하우징의 한쪽 면을 완전 구속 후 설계 목표 변형치인 55 $\mu\text{m}$ , 45 $\mu\text{m}$ 의 변위를 각각 클램프와 익스텐더 예압하우징에 인가하였다. 그 결과 최대응력은  $2.65 \times 10^8 \text{N/m}^2$ 과  $2.608 \times 10^8 \text{N/m}^2$ 로 Al-6061의 항복응력( $3.10 \times 10^8 \text{N/m}^2$ ) 아래에서 변형됨을 확인하였다.

### 3.2 정적 안정성 평가

인치웜모터의 안정성 확보를 위해 외부의 전단력으로 부터 PZT에 인가되는 전단력을 최소화시켜야 한다. Fig. 5는 외부 전단력이 PZT에 미치는 영향을 최소화하기 위하여, 예압하우징과 클램프 사이의 접촉 조건에 따른 정적 해석 결과를 보여주고 있다. 왼쪽은 예압하우징과 커넥터 사이에 고탄소강 볼을 넣어 점접촉을 구현한 결과를 보여주고 있으며, 오른쪽은 면 접촉을 구현한 결과를 보여주고 있다. 점접촉의 경우 클램핑 시 발생하는 전단력이 볼의 슬립(slip) 구동에 의해 대부분 소멸되어 예압하우징과 PZT에 일정한 수직응력만이 전달되어 지나, 면접촉의 경우, 대부분의 전단응력이 그대로 전달되어 한쪽 면에만 응력이 집중되는 것을 확인할 수 있다. 이때 PZT에 인가되는 최대 전단응력은  $2 \times 10^4 \text{N/m}^2$ 와  $3 \times 10^8 \text{N/m}^2$ 로 거의 두 배에 가까운 수치를 보이고 있다. 따라서 예압하우징과 클램프의 볼 점접촉의 경우, PZT의 구

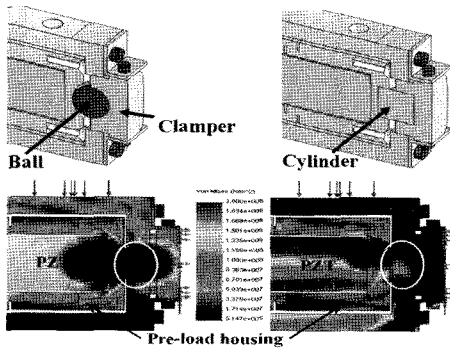


Fig. 5 Comparison of FEM results between ball contact (left) and cylinder contact(right)

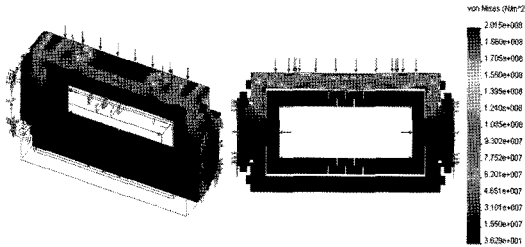


Fig. 6 FEM result of clamp actuator at applied reaction force

동시 톨 가이드와의 마찰에 의해 발생하는 전단력과 모멘트의 대부분이 상쇄되고 축방향 압축력만이 PZT에 전달되어 파손의 위험을 막을 수 있게 된다.

Fig. 6은 인치웜모터가 4단계 상태 시(Fig. 1)를 해석한 결과로 인치웜모터의 익스텐더에 의한 프레스 시, 익스텐더의 출력힘에 의해 클램프에 발생하는 전단력이 PZT와 예압하우징에 어떤 영향을 미치는지를 보여주고 있다. 이때, 커넥터의 양면을 구속시키고 클램프는 40 $\mu$ m의 변위 구속을 적용하였으며, 익스텐더에서 발생하는 출력힘인 1600N의 반력을 인가하였다. 해석 결과 클램프의 예압하우징 보다는 하우징 커버에 최대응력 2.043 $\times 10^8$ N/m<sup>2</sup>이 분포함을 확인하였다. 이러한 결과로부터 볼 접촉 구현을 통해 인치웜모터의 구동 시 발생하는 전단응력의 일부가 상쇄됨을 확인할 수 있으며 PZT의 구동 안정성 확보가 가능함을 확인하였다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

Fig. 7은 인치웜모터 구성도 및 측정 장비를 보여주고 있

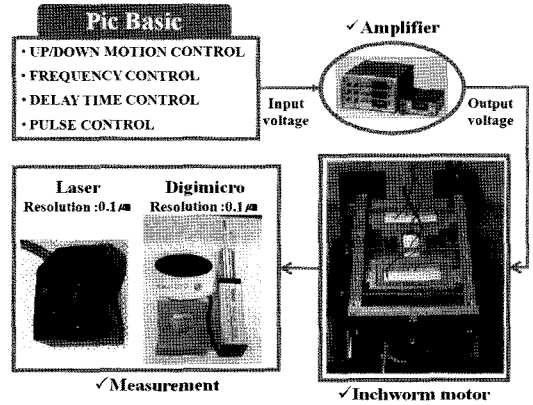


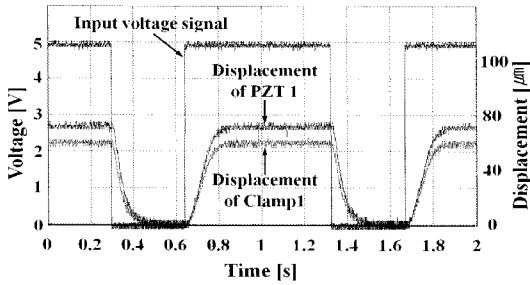
Fig. 7 Experimental setup

Table 2 Comparison of FEM results and experiments for design target

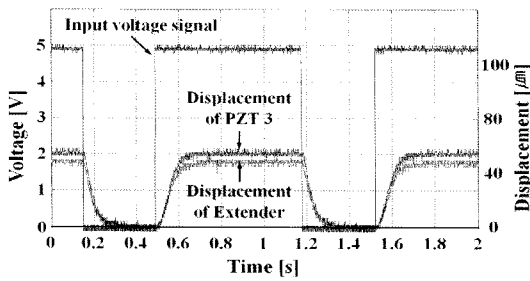
		clamp1	extender	clamp2
Design	Blocking Force [N]	3000	2550	3000
	Displacement [ $\mu$ m]	55	42	55
	Housing Stiffness [N/ $\mu$ m]	54.5	60	54.5
FEM Analysis	Blocking Force [N]	2528	2393	2528
	Displacement [ $\mu$ m]	58.9	43	58.9
	Housing Stiffness [N/ $\mu$ m]	42.9	55.9	42.9
Experiment	Blocking Force [N]	2640	2200	2640
	Displacement [ $\mu$ m]	58	44	58
	Housing Stiffness [N/ $\mu$ m]	45.5	50	45.5

다. 전체 시스템은 개루프 제어(open loop control)로 수행되어진다. Pic-Basic(micro processor)에 의해 주기 및 펄스폭이 조절된 5V의 입력전압을 고전압 증폭기에서 1000V 증폭하여 각각의 PZT 액추에이터에 순차적으로 인가함으로써 인치웜모터가 구동되어진다. 이러한 인치웜모터의 구동속도와 변위를 측정하기 위하여 레이저측정기(Omron Co. Z4M-S30V)와 Digimicro(Nikon Co. MF-501)가 사용되었다. Table 2는 인치웜모터의 초기 설계 목표와 수치해석 결과 그리고 실제 제작된 인치웜모터의 변위에 대한 비교치를 보여주고 있다. 가공 및 조립, 예압 등의 오차에 의해 설계 목표치와 약간의 차이를 보이고 있으나 변위에 있어서는 해석 결과와 측정결과의 차이가 약 2% 내에 존재함을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 예압하우징에 의해 예압을 받고 있는 PZT의 변위 특성을 보여주고 있다. PZT 1의 경우 약 77.4 $\mu$ m의 변위를 발생하였으나, 예압하우징을 결합 후 측정된 결과는 약



(a) Clamper 1,2

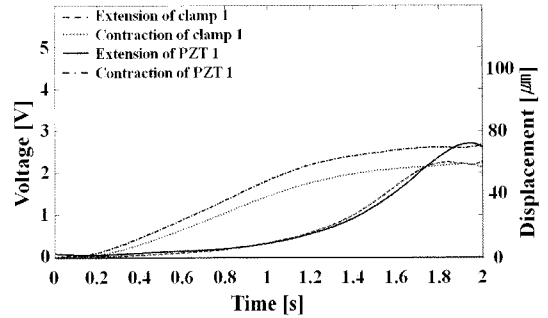


(b) Extender

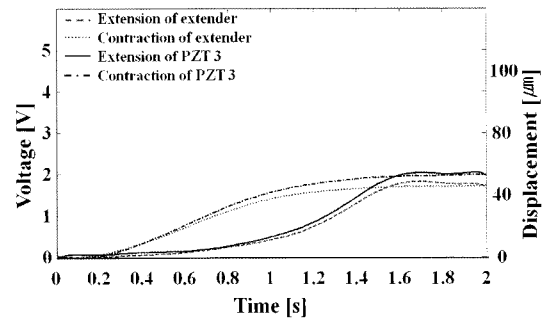
Fig. 8 Displacement of inchworm motor w.r.t pre-load

58 μm로 감소하였다. 또한 익스텐더의 경우도 예압이 없는 PZT 3의 경우 약 55.1 μm의 범위에서 예압이 인가되었을 때 약 44 μm로 감소함을 확인하였다. 이는 예압에 의해 PZT의 출력힘이 증가하면서 전체 변위가 감소하게 된 것이다. 또한 이러한 예압은 PZT의 고유 특성인 히스테리시스를 줄여준다. 이러한 히스테리시스의 감소는 PZT의 응답특성 및 변위 정밀도를 증가시킨다. Fig. 9는 이러한 예압에 의해 줄어든 PZT의 히스테리시스 특성을 나타내고 있다. PZT 예압 시 히스테리시스는 약 20% 정도 감소함을 확인할 수 있다.

Fig. 10은 제작된 인치웜모터의 입력 전압의 주파수에 따른 톨 가이드의 이송속도를 측정된 결과를 보여주고 있다. 주파수가 증가함에 따라 빠르게 증가하던 이송속도는 16Hz를 기점으로 급격하게 감소하였다. 이러한 주파수에 따른 특성은 고전압 증폭기의 출력과 PZT의 정전용량(capacitance)에 가장 큰 영향을 받게 된다. 본 연구에서 사용된 소형 고전압 비례 증폭기는 정전용량이 500 μF인 PZT를 5Hz 이상 구동시킬 경우, 입력 전압에 대한 출력 변위가 손실되는 슬루율(slew rate)이 발생하게 된다. 따라서 5Hz까지 증가하던 이송속도의 증가율이 5Hz 이상에서는 다소 감소하고 있음을 확인할 수 있다. 또한 5Hz 이상에서는 슬루율에 의해 발생하는 손실 변위에 비해 주파수 증가에 따른 전체적인 입력



(a) Clamper 1,2



(b) Extender

Fig. 9 Hysteresis of inchworm motor

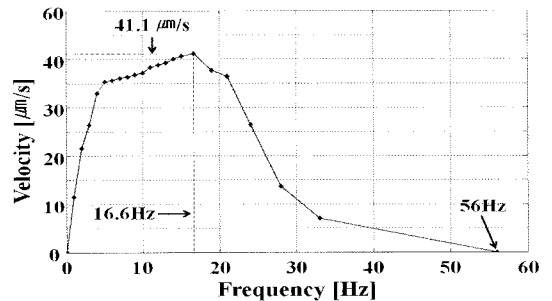


Fig. 10 Velocity of inchworm motor according to frequency

전압의 듀티비(duty ratio)가 증가하기 때문에 인치웜모터의 이송속도가 다소 증가하게 된다. 그러나 16Hz 이상에서는 손실 변위의 증가가 너무 크기 때문에 인치웜모터의 이송속도가 감소하는 것으로 추정된다. 이때, 인치웜모터의 최대 이송속도는 16Hz에서 41.1 μm/s로 측정되었다.

PZT는 분극처리를 통해서 만들어지며, PZT의 특성상 큐리온도(300°C) 이상이 되면 분극현상이 소멸된다. 따라서 PZT의 연속 구동에 따른 온도 변화 특성을 확인해야만 한

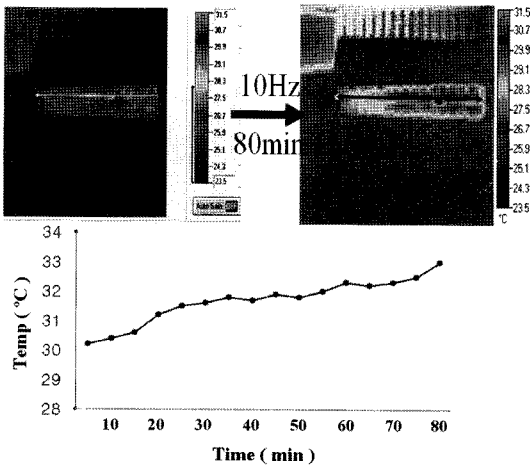


Fig. 11 Temperature variation during operation of PZT

다. Fig. 11은 PZT의 연속 구동 시 발생하는 열을 열화상 카메라(Infra-Red camera)를 이용하여 관찰한 결과를 보여 주고 있다. 10Hz의 주파수로 80분 동안 연속 구동 결과, 최대 3°C 정도의 온도 상승을 보이고 있다. 그러나 인치웜모터의 구동 시에는 커넥터와 톨 가이드 사이의 마찰 등으로 더 많은 열이 발생할 것이며, 이러한 열은 인치웜모터의 정밀 이송을 방해하는 요인으로 작용할 것이다. 따라서 열 발생을 최소화 시킬 수 있는 구동 방식 및 열 방출을 위한 연구가 진행되어야 할 것이다.

## 5. 결론

본 연구에서는 고하중/대변위의 특성을 가지는 소형 마이크로 프레스용 구동기 개발을 위해 PZT 액츄에이터를 이용한 인치웜모터의 설계 및 제작, 구동 특성에 대한 분석을 수행하였다.

- (1) 예압하우징의 설계 및 FEM 해석을 통해 예압 구조물의 응력특성 분석을 수행하였다. 또한 PZT의 안정성을 확보하기 위해 커넥터와 예압하우징 사이에 볼을 사용하여 점접촉을 구현하였다. 이러한 점접촉은 인치웜모터의 구동 시 발생하는 전단응력이 PZT에 최소로 전달되도록 하는 역할을 수행한다.
- (2) 인치웜모터의 제작 및 구동 특성 분석을 수행하였다. 제작된 인치웜모터의 PZT는 예압을 통해 히스테리시스를 감소시킬 수 있었으며, 16Hz에서 약 41.1 $\mu$ m/s의 최대

이송 속도가 측정되었다. 또한 PZT의 예압을 통하여 약 20%의 히스테리시스 감소 효과를 확인하였다.

- (3) 향후 인치웜모터의 고속 구동 시 발생할 수 있는 클램프와 톨 가이드의 마찰력과 미끄러짐 현상, 열적 특성 등의 문제점 규명과 정밀 이송 제어를 위한 최적 알고리즘 개발을 통한 인치웜모터의 구동 성능을 향상을 위한 연구가 진행되어질 예정이다. 또한 PZT 액츄에이터의 변위의 한계성(<수십 $\mu$ m) 때문에 정밀 가공을 통한 가공 오차를 줄이고 조립 시 발생하는 조립오차 최소화를 위한 연구도 병행될 예정이다.

## 후기

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

또한 이 연구에 참여한 연구자는 ‘2단계 BK21 사업’의 지원비를 받습니다.

## 참고 문헌

- (1) Kussul, E., Baidyk, T., Ruiz-Huerta, L., Caballero-Ruiz, A., Velasco, G., and Kasatkina, L., 2002, “Development of Micromachine Tool Prototypes for Micro-factories,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 12, pp. 795~812.
- (2) Jeong, S. J., Kim, G. H., Cha, K. R., Lee, K. H., and Song, S., 2006, “A Study on the Motion Mechanism of Multi-Axis Ultra Precision Stage for Optical Element Alignment,” *Transactions of KSMTE*, Vol. 15, pp. 8~16.
- (3) Cady, W. G., 1964, *Piezoelectricity*, McGraw-Hill, New York.
- (4) Haertling, G., 1999, “Ferroelectric ceramics: History and technology,” *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 82, pp. 797~818.
- (5) Lim, J. H., Shon, J. H., Kim, J. J., Park, B. O., and Cho, S. H., 1995, “Variations of Piezoelectric Properties and Compressive Strength of PZT Ceramics with Poling Directions,” *Journal of the Korean*

*Ceramic Society*, Vol. 32, pp. 1131~1138.

- (6) Liu, Y. T., Fung, R. F., and Huang, T. K., 2004, "Dynamic Responses of a Precision Positioning Table Impacted by a Soft-mounted Piezoelectric Actuator," *Precision Engineering*, Vol. 28, pp. 252~260.
- (7) Adriaens, H. J. M. T. A., Koning, W. L., and Banning, R., 2000, "Modeling Piezoelectric Actuators," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 5, pp. 331~341.
- (8) Park, J., Keller, S., Carman, G. P., and Hahn, H. T., 2001, "Development of a Compact Displacement Accumulation Actuator Device for both Large Force and Large Displacement," *Sensors and Actuators, A* 90, pp. 191~202.
- (9) Vorndran, S., 2001, *MicroPositioning Nanopositioning NanoAutomation*, Physik Instrumente (PI) GmbH, Germany.