

# 자속경로 스위칭에 의한 인치웜 액츄에이터의 설계 및 해석

정재성\* · 민현진\* · 김상채\*\* · 김수현\* · 곽윤근\*

## Design and Analysis of an Inchworm Actuator with Electromagnetic Switching

Jae Sung Jung\*, Hyun-jin Min, Sang-Chae Kim, Soo Hyun Kim, and Yoon Keun Kwak

**Key Words :** Inchworm actuator(인치웜 액츄에이터), Electromagnetic clamber(전자석 클램퍼), Permanent magnet(영구자석), Piezoelectric element(압전소자)

### Abstract

In general, inchworm actuators are composed of two clamping piezoelectric elements and one expansion piezoelectric element. In this paper, two electromagnetic clammers are used for higher speed and high load. Dynamic equation is derived to simulate the behavior of the inchworm actuator with electromagnets. Electromagnetic clamber is used to improve the performance of the inchworm actuator. The electromagnetic clamber is composed of two permanent magnets and one traditional electromagnet. The permanent magnets play the role of the source of magnetic field to make clamping force higher, and the electromagnet is to change the mode between clamping and free. The driving voltage profile is also analyzed to improve the speed of inchworm actuator. The real system was manufactured and experimented to find dynamic characteristics and the maximum speed is obtained. Dynamic model is verified by comparing with experimental results.

### 1. 서론

최근 산업이 급속도로 발전하면서 제품들은 성능을 높이고 다양한 기능을 집적하기 위해 초정밀, 소형화, 고밀도화되어 가고 있다. 이러한 제품의 성능은 대부분 부품의 조립 및 검사 공정의 정밀도 수준에 의해 결정되어진다. 특히, 정밀광학기기, 초정밀 가공기, 고밀도 자기기록디스크, 반도체장비 등에 있어서 위치결정 정밀도는 생산된 제품의 성능을 직접적으로 결정짓는 중요한 요소이다. 이러한 장비들에 대한 정밀도를 충족시키기 위해서는 구동 액츄에이터의 소형화 및 고정밀도화가 요구된다. 기존의 공압, 유압, 그리고 전기적 액츄에이터로는 서브 마이크로미터 이하의 정밀도 구현과 소형화의 어려움이 존재한다.

이러한 이유로, 최근에 형상기억합금, 정전액츄에이터, 보이스코일모터(VCM) 등 새로운 원리를 이용한 액츄에이터에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 압전소자(Piezoelectric element)에 대한 연구도 이러한 흐름의 한가지로 볼 수 있다. 압전소자는 소형, 경량이며 큰 힘을 낼 수 있고 나노 수준의 분해능을 갖는 초정밀 구동이 가능하며, 에너지 변환 효율이 좋은 장점을 가지고 있다. 압전소자를 이용한 액츄에이터에도 여러 가지 종류가 있으며, 그 중에서도 인치웜 액츄에이터(Inchworm actuator)는 정밀도가 높고 구동범위가 무한한 장점이 있다.

### 2. 전자석을 이용한 인치웜 액츄에이터

본 연구에서는 기존의 압전소자를 이용한 클램퍼 대신 전자석 클램퍼를 이용한 인치웜 액츄에이터를 제안한다. 전자석을 이용한 인치웜 액츄

\* 한국과학기술원 기계공학과

\*\* 삼성전자

에이터의 기본적인 구조는 Fig.1 과 같다. 전자석을 이용한 인치웜 액츄에이터는 두개의 전자석과 미소변위를 발생하는 압전소자로 구성된다. 두개의 전자석은 액츄에이터를 클램핑하는데 필요한 전자기력을 발생시키며, 압전소자는 두 전자석의 상대거리를 변화시키는 역할을 한다. 인치웜 액츄에이터는 직선운동을 하기 위해 V 형 가이드 (Guide) 위에 장착된다.

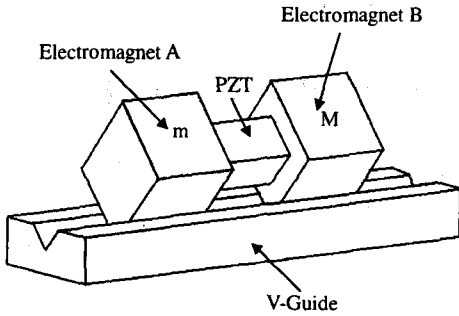


Fig. 1 Inchworm actuator using electromagnets

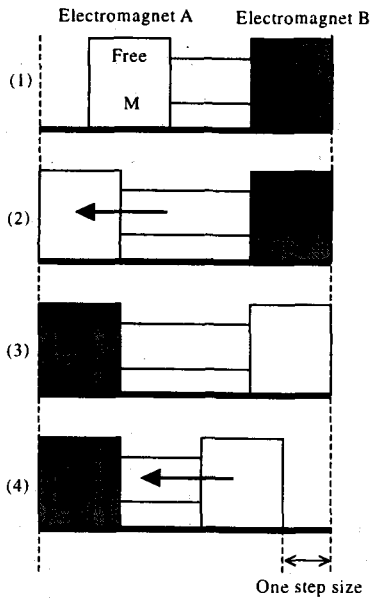
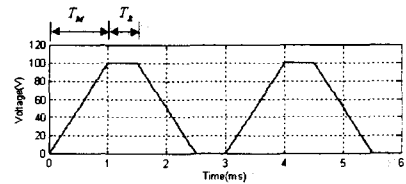


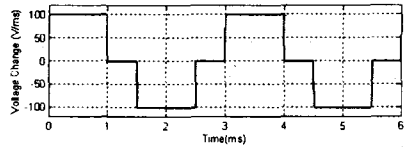
Fig. 2 Driving principle of the inchworm actuator

Fig. 2 는 인치웜 액츄에이터의 구동원리를 나타내고 있다. Fig. 2 의 (1)과정에서는 전자석 B 의 코일에 전류를 흘려 전자석 B 를 바닥에 클램핑시키고, 전자석 A 는 자유상태를 유지시킨다. (2)는 (1)의 상태에서 압전소자가 늘어나 전자석 A 를 왼쪽으로 이동시키는 과정이다. (3)과정에서는 압전소자가 늘어난 후, 전자석 A 의 코일에 전류가

흘러 전자석 A 를 바닥에 클램핑시킨 후 전자석 B 의 코일에서 전류를 제거시킴으로써 전자석 B 를 자유상태로 만든다. 마지막으로 (4)과정에서 (3)의 상태에서 압전소자가 수축하여 전자석 B 를 왼쪽으로 이동시키게 된다. 이상의 (1)~(4)의 과정을 반복 수행함으로써 인치웜 액츄에이터는 미소변위를 축적하면서 광역의 범위를 이동하게 된다. 압전소자를 구동하는 전압파형으로는 Fig. 3 과 같은 사다리꼴 파형이 가장 일반적으로 사용되고 있다. 전압파형에서 압전소자가 인장하거나 압축되는 시간을 변화시간  $T_M$  으로 인장이나 압축된 상태를 유지하는 시간을 정지시간  $T_R$  으로 표기한다



(a) PZT driving voltage profile



(b) Electromagnet driving profile

Fig. 3 Trapezoidal voltage profile

### 3. 동역학적 모형화

인치웜 액츄에이터의 운동현상을 해석하기 위해 동역학적인 모형화가 필요하며, 이를 위해 인치웜 액츄에이터는 Fig. 4 와 같이 표현할 수 있다. 양쪽의 전자석을 집중질량으로 가정하고, 압전소자의 질량, 강성, 감쇠를 고려하여 전체 시스템을 2 자유도 반한정계로 모형화하였다. 그리고, 압전소자의 길이, 변화량과 전자석과 V 형 가이드 사

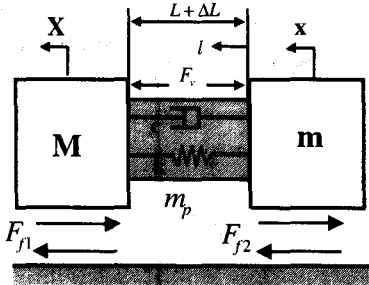


Fig. 4 Dynamic modeling of the inchworm actuator

이의 건조마찰을 고려하여 운동방정식을 도출하였다. 전체 시스템의 운동에너지, 위치에너지, 감쇠함수 구하여 라그랑지언 방정식(Lagrange equation)에 대입하면 식(2)와 같이 운동방정식을 유도할 수 있게 된다.

$$Q_X = c\Delta\dot{L}_E + k\Delta L_E - F_{f1} = cd_{33}\dot{V} + kd_{33}V - F_{f1} \quad (1)$$

$$Q_x = -c\Delta\dot{L}_E - k\Delta L_E - F_{f2} = -cd_{33}\dot{V} - kd_{33}V - F_{f2}$$

$$\begin{bmatrix} M + \frac{m_p}{3} & \frac{m_p}{6} \\ \frac{m_p}{6} & m + \frac{m_p}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{X} \\ \ddot{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c & -c \\ -c & c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k & -k \\ -k & k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c \cdot d_{33}\dot{V} + k \cdot d_{33}V - F_{f1} \\ -c \cdot d_{33}\dot{V} - k \cdot d_{33}V - F_{f2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

윗 식에서  $\Delta L_E$ 는 전압에 의한 압전소자의 길이 변화이며,  $d_{33}$ 는 압전소자의 히스테리시스 특성을 포함한 단위 전압에 대한 압전소자의 길이 변화를 나타낸다.  $V$ 는 압전소자에 가해주는 전압을 나타낸다. 윗 식에서 마찰력  $F_i$ 는 식(3)과 같이 블록의 무게, 압전소자의 무게, 전자석에 의한 수직항력에 마찰계수가 곱해지는 형태이다. 마찰계수  $f(\dot{X})$ 는 운동상태와 정지상태에 따라 다른 값으로 주어지며 블록의 상태에 따라 달라지므로 스틱슬립 모델을 적용하여 마찰계수 값을 얻는다.

$$F_{f1} = f(\dot{X}) \left[ N_1 + \frac{(M + m + m_p)g}{2} \right] \quad (3)$$

$$F_{f2} = f(\dot{x}) \left[ N_2 + \frac{(M + m + m_p)g}{2} \right]$$

식(3)에서  $N_1$ 과  $N_2$ 는 각각 전자석 A와 전자석 B에서 발생하는 전자석에 의한 수직항력으로 간단한 수식으로 표현하기 어려우므로 상용 자기 해석 프로그램인 맥스웰(Maxwell)을 이용하여 구한다.

#### 4. 이송속도 향상을 위한 전압파형 분석

인치웜 액츄에이터의 구동 전압은 일반적으로 Fig. 2와 같은 사다리꼴 전압파형을 사용한다. 앞에서 도출한 운동방정식과 사다리꼴 전압파형을 이용하여 액츄에이터의 변위 및 속도에 대한 모의 실험을 수행하였다. Fig. 5는 사다리꼴 전압파형에 대한 액츄에이터의 속도분포를 나타낸다. 그림의 속도분포에는 많은 임펄스가 존재하는데, 이것은 마찰의 스틱슬립 현상에 의해 발생한다. 이러한 임펄스는 파형의 전압속도가 갑자기 변하는 부분에서 크게 발생하는데, 이러한 임펄스는 이송 속도 향상에 도움이 되기도 하지만 밀림 현상에 의해 속도 저하를 유발하기도 한다. 그러므로 이송속도 향상을 위해 속도 저하를 유발하는 임펄스 부분만을 제거할 수 있는 Fig. 6과 같은 지수함수 속도파형을 제안한다.

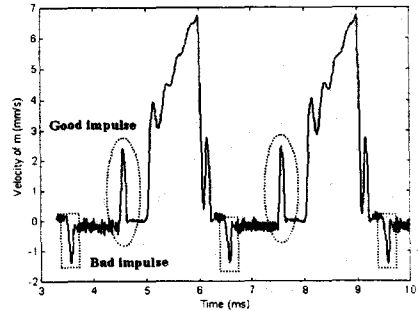


Fig. 5 Velocity of inchworm actuator

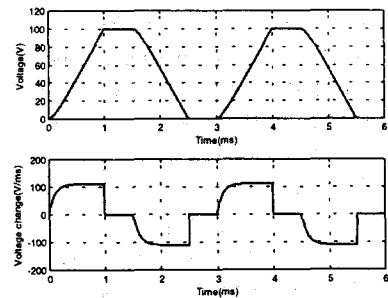


Fig. 6 Exponential velocity voltage profile

지수함수 속도파형은 압전소자에 가하는 전압의 시간에 대한 변화가 Fig. 6과 같이 지수함수 형태를 가진다. 지수함수 속도파형에서는 시간상수가 포함되는데 이 시간상수에 대한 이송 속도 모의 실험결과 Fig. 7과 같은 선형속도 파형일 때 가장 큰 속도를 낼 수 있음을 알 수 있었다.

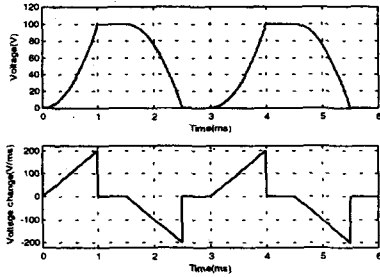


Fig. 7 Linear velocity voltage profile

## 5. 자속경로전환을 이용한 전자석클램퍼

클램퍼로 사용할 전자석은 일반적으로 사용하는 철심에 코일을 감아서 사용하게 될 경우 코일의 인덕턴스 및 열발생 문제 때문에 클램핑에 필요한 충분한 힘을 얻지 못한다. 이러한 문제점을 해결할 수 있도록 자속 경로 전환을 이용한 전자석 클램퍼를 제안한다.

자속 경로 전환을 이용한 Fig. 1의 클램퍼 A와 B는 Fig. 8와 같은 구조를 가진다. Fig. 8의 구조는 코일구조에 두개의 영구자석을 첨가한 것이다. 각각의 영구자석은 Fig. 8에 표시된 방향으로 자기장이 설정되어 있으며, 코일에는 양방향 전류가 흐를 수 있게 한다. 코일의 인덕턴스에 의해 코일에 흐르는 전류만으로 클램핑에 필요한 힘을 발생하기에는 부족하다. 따라서, 영구자석의 자기장을 클램핑에 필요한 자기장 소스로 이용하고, 코일에 흐르는 전류는 영구자석의 자기장의 흐름만을 바꾸어 주는 스위치 역할을 하게 한다.

Fig. 9는 클램핑모드(Clamping mode)와 자유모드(Free mode)에서의 전자석 동작원리를 보여주고 있다. 클램핑 모드에서는 코일에 흐르는 전류에 의해 자기장이 왼쪽에서 오른쪽으로 흐름으로써 영구자석의 자기장 흐름을 V형 가이드 쪽으로 이동시키게 한다. 영구자석의 자기장과 코일에 흐르는 전류에 의한 자기장이 합해져서 코어와 V형 가이드를 통해 흐르게 되며, 이 자기장에 의해 코어와 V형 가이드 사이에 인력이 작용하게 된다. 자유 모드에서는 코일에 흐르는 전류에 의해 자기장이 오른쪽에서 왼쪽으로 흐름으로써 영구자석에서 흘러나오는 자기장이 대부분 코어 속으로 들어가게 되며, 이에 따라 V형 가이드로 흘러가는 자기장은 거의 없게 된다. 이처럼 전류를 적절히 양방향으로 흘려주면 같은 조건에서 높은 전자석 항력을 얻을 수 있게 된다.

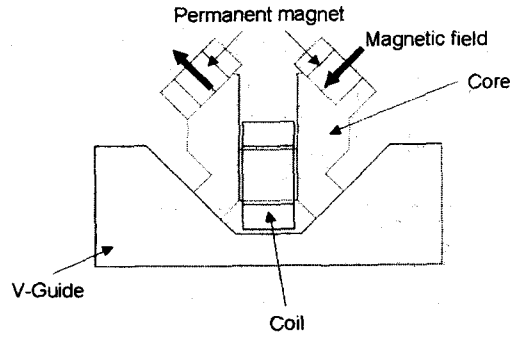


Fig. 8 Structure of electromagnetic clasper

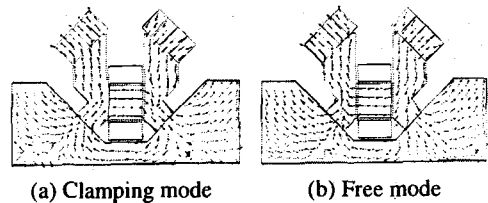


Fig. 9 Principle of electromagnetic clasper

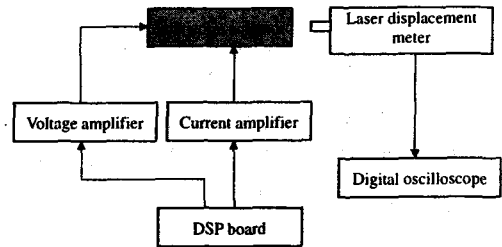


Fig. 10 Block diagram of experimental setup

## 6. 구동특성 실험

영구자석과 전자석을 적용한 클램퍼를 가지는 인치웜 액추에이터를 제작하고, Fig. 10과 같은 실험장치를 구성하여 구동실험을 수행하였다. 실험에서는 클램핑모드 전류, 자유모드 전류, 변화시간, 정지시간 등을 변화시키면서 액추에이터의 변위 및 이동속도를 측정하였다. Fig. 11은 여러가지 조건에서 액추에이터의 이동 변위를 시간에 대해 표시한 것이다. Fig. 11 중 왼쪽 상단의 그래프가 변화시간이 가장 작을 때이며, 오른쪽 하단의 그래프가 변화시간이 가장 길 때이다. 그림에서 처럼 변화시간이 짧을 경우 액추에이터의 변위에 굴곡이 많으며 변화시간이 길수록 인치웜 운동에 가까운 계단모양의 변위이동 형태를 보이고

있다. 변화시간이 짧을 경우에는 압전소자의 길이가 순간적으로 변하기 때문에 전자석이 액츄에이터를 정확히 바닥에 고정시키지 못하게 된다. 이렇게 전자석이 밀리는 현상이 발생하기 때문에 Fig. 11 에서와 같은 굴곡이 생기는 것이다.

Fig. 12 는 각 실험변수에 대한 액츄에이터의 이송속도 분포를 나타내고 있다. 변화시간에 대해서는 피크를 가지며 정지시간이 작을수록 그리고 전류가 클수록 속도가 크다는 것을 확인할 수 있다. Fig. 12 의 전류에 대한 그래프에서 이송 속도는 전류에 대해 포화되는 부분이 생기는 것을 확인할 수 있다. 포화되는 부분이상으로 전류를 높이는 것은 효율적이지 못하므로 클램핑모드전류 및 자유모드전류를 각각 0.7A, 0.6A 로 고정한다

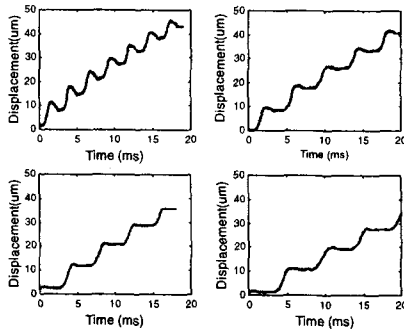


Fig. 11 Moving displacement of the inchworm actuator

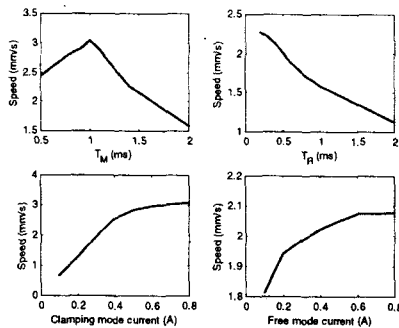
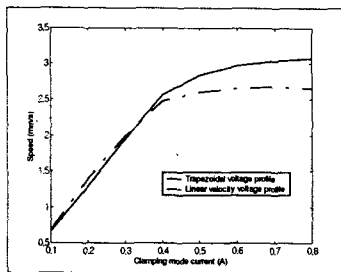
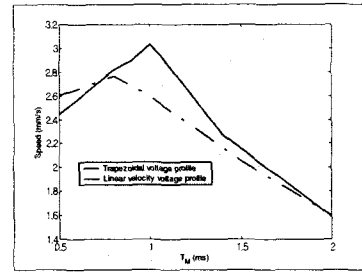


Fig. 12 Speed of inchworm actuator



(a) Speed according to the clamping mode current



(b) Speed according to the  $T_M$

Fig. 13 Comparison of speed

실험을 통해 이러한 조건에서 변화시간이 1 ms, 정지시간이 0.2 ms 일 때 최고 이송 속도 3.042 mm/s 를 얻을 수 있었다. 그리고 실험을 통한 부하능력은 약 0.9kg 으로 나타났다. 이러한 수치는 현재 나와있는 인치웜 액츄에이터의 성능에 비해 약 100% 이상의 향상을 얻은 결과이다.

전압파형에 따른 이송 속도의 경향을 실험적으로 확인하기 위해 사다리꼴 파형과 선형속도파형에 대한 이송 속도 실험 결과를 Fig. 13 와 같이 도시하였다. 실험은 클램핑모드전류와 변화시간에 대해서 두 파형에 대한 이송 속도를 비교한 것이다. Fig. 13 에서 알 수 있듯이 두 변수 모두에 대해서 선형속도 파형이 전체적으로 이송 속도가 큰 것을 알 수 있다. 이것은 앞서 설명한 임펄스를 이용한 전압파형 분석이 타당함을 의미하는 것이다.

## 7. 결론

본 연구에서는 전자석 클램퍼를 이용한 새로운 형태의 인치웜 액츄에이터를 제안하였다. 전자석을 이용한 새로운 구조의 인치웜 액츄에이터의 동역학적 모델을 제시하였고, 실험을 통해서 모델의 타당성을 검증하였다. 일반적인 전자석의 단점을 극복할 수 있는 자속 경로전환을 이용한 전자석 클램퍼를 설계하였고 실제로 이를 구현하였다. 구동특성 실험을 통해서 전자석 클램퍼를 이용한 인치웜 액츄에이터가 기존의 인치웜 액츄에이터에 비해 이송 속도 및 부하능력에서 더 개선된 성능을 보임을 알 수 있었다.

## 참고문헌

- (1) Toshiro Higuchi, Masahiro Watanabe, and Kenichi Kudou, "Precise Positioner Utilizing Rapid

- Deformations to a Piezoelectric Element," JSPE, Vol. 11, No. 54, pp. 2107-2112, 1988.
- (2) Hisayuki Aoyama, and Takayuki Iwasaki, "Design and Fabrication of a Piezo-Magnetic Mini-Walker," JSPE, 1993.
  - (3) S. Sakuta, K. Ogawa, and K. Ueda, "Experimental Studies on Ultra-precision Positioning," Int. J. Japan Soc. Prec. Eng., Vol. 27, No. 3, pp. 235-240, 1993.
  - (4) Jin-Hua Chin, and Chun-Chen Chen, "A Study of Stick-slip Motion and its Influence on the Cutting Process," Int. J. Mech. Sci., Vol. 35, No. 5, pp. 353-370, 1993.
  - (5) T. Oiwa, T. Kamiura, and A. Kyusojin, "High-Rigidity Multi-Degree-of-Freedom Fine Motion Mechanism using Piezoelectric Actuators (2 nd Report)," JSPE, Vol. 62, No. 9, pp. 1302-1306, 1996.
  - (6) Ph. Niedermann, R. Emch, and P. Descouts, "Simple piezoelectric Translation Device," Rev. Sci. Instrum., Vol. 59, No. 2, pp. 368-369, 1988.