

인치웜 구조를 갖는 선형 스테이지의 속도 특성연구

Speed Property Evaluation of an Inchworm Type Linear Stage

문 찬 우¹

Moon Chanwoo¹

Abstract Precision stages are essential device for micro machines, fiber optic assembly systems, and biology instruments. In this paper, a precision inchworm type actuator for a linear stage is proposed and evaluated. An analytic method to design an inchworm type motor is proposed. Developed actuator provides fast motion compared with a commercial inchworm actuator, and can be used as an actuator for a stage in substitution for a conventional rotary actuator.

Keywords : Inchworm type motor, Fast motion, Linear stage, Long stroke

1. 서 론

최근에 이르러, 생명공학에서 세포 조작 장비의 시장 확대, 마이크로 부품 제작의 필요성 등에 따라, 초정밀 위치결정 기구의 필요성이 증대되고 추세이다. 이에 따라서 초정밀 위치 결정 기술의 핵심이 되는 초정밀 구동기와 위치센싱 모듈 등의 개발이 추진되고 있다. 정밀기기에 사용되는 구동장치로는 리니어 모터, 마이크로 스텝모터나 압전구동기가 있는데 압전구동기는 소형화가 가능하고 선형성과 빠른 응답성 등의 특성이 뛰어나 나노미터 정도의 정밀도를 갖는 초정밀 위치 결정장치에 널리 사용되고 있다. 정밀기구의 구동에 있어 단순 압전소자를 사용하는 경우도 많으나, 이러한 압전소자는 행정거리가 백 μm 이하인 경우가 많아 긴 행정거리가 필요한 경우 기구적으로 변위를 확대한 압전구동기를 사용해야 한다. 압전 소자를 이용한 대 변위 압전구동기에는 선형/회전형 초음파 모터, 인치웜 구동기, 관성구동 구동기 등이 있는데, 이 중에서 인치웜 구동기는 추력이 크고 단순 압전소자에 비해 긴 행정거리를 얻을 수 있어 작업 영역이 수 mm에서 수 cm 정도의 소형 리니어 스테이지에 적합하다^[1,2]. 그러나 인치웜 구동기는 이송속도가 느린데, 현재 상용화 되어 있는 EXFO 사의 인치웜 구동기는 1.5mm/s 수준이다. 추력을 증가시키기 위한 몇 가지 새로운 형태의 인치웜 구

동기가 제안되기도 하였으나^[3,4,5] 추력에 못지 않게, 이송속도는 생산성에 관계된 중요한 요소로서 개선이 필요한 부분이다. 본 논문에서는 압전 소자를 사용하는 인치웜 구동기의 속도 특성을 해석하기 위해 상태 전이 다이어그램에 기반한 전기적 모델링과 기계적 모델링에 의한 해석 방법을 제안하고, 제안된 가이드라인에 따라 속도 특성이 개선된 인치웜 타입의 구동기를 개발한다. 또한 상용의 위치 제어장치와 쉽게 접속할 수 있도록 전용 제어기를 구현하고 개발된 인치웜 타입 구동기의 특성을 평가한다.

2. 인치웜 구동기의 속도 특성 분석

인치웜 구동기의 동작은 마치 자벌레의 이동 원리와 같이 확장/수축 구동과 클램핑 구동으로 이루어지며, 이들의 순차적인 구동에 따라 구동기에 결합된 스테이지를 움직이게 된다. 이때, 구동기의 구동 논리는 구동기의 구조에 따라 달라진다. 클램핑 구동은 스테이지의 이송 부분이 축이나 도관에 고정되는 동작이고, 확장/수축 구동은 이송부분이 실제적으로 움직이는 동작이다. 따라서 구동 논리는 클램핑 구동과 확장/수축 구동의 반복으로 나타난다. 그림 1은 인치웜 구동기의 상태전이 다이어그램으로, 모두 N 개의 시퀀스를 주기로 동작이 이루어지는 경우이다. 가장 기본적인 구동 원리는

¹ 국민대학교 전자공학부(E-mail : mcwnt@kookmin.ac.kr)

참고문헌^[2]에서 찾을 수 있다. 인치웸 구동기는 확장/축소 운동에 의해 나노미터 수준의 분해능을 가질 수 있으며, 이 운동을 여러 사이클에 걸쳐 수행함으로써 긴 행정거리를 갖게 된다.

그림 1 과 같은 구동 논리를 갖는 인치웸 구동기의 한 사이클당 평균속도는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$s = \frac{\sum_{i=1}^N d_i}{\sum_{j=1}^N t_j} \quad (1)$$

d_i : i 번째 운동 상태에서의 구동한 거리

t_j : j 번째 구동을 하는데 소요되는 시간

여기서 d_i 는 구동기의 구조에 의해 결정되며, t_j 는 압전체의 모델링으로부터 근사치를 구할 수 있다. 각 압전체는 그림 2와 같이 전기적인 모델링과 기계적인 모델링으로 표시할 수 있다. 전기적 모델은 간단한 RC회로이며 전기적 모델에서 j 번째 구동을 하는데 소요되는 시간 t_e 는 식 (2)와 같이 주어진다.

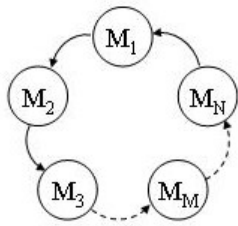
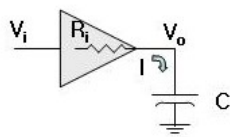
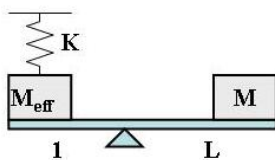


그림 1. 인치웸 구동기의 상태전이 다이어그램



구동부의 전기적 모델



구동부의 기계적 모델

그림 2. 인치웸 구동기의 모델링

$$t_e = C \frac{V_o}{I} \quad (2)$$

I : Current limit of amplifier

C : Capacitance of piezo actuator

기계적 모델에서는 스프링-질량의 2차 시스템을 사용하며 근사식을 통해 j 번째 구동을 하는데 소요되는 시간 t_m 은 식 (3)와 같이 주어진다.^[6]

$$t_m \approx \frac{3}{f_o'} \quad (3)$$

$$f_o' = f_o \sqrt{\frac{m_{eff}}{m_{eff} + L \cdot M}}$$

$$f_o = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m_{eff}}}$$

m_{eff} : Effective mass of piezo actuator

K : Effective stiffness of piezo actuator

M : Mass of load

L : Displacement amplification ratio

두 모델로부터 j 번째 구동을 하는데 소요되는 시간 t_j 는 식 (4)와 같이 구할 수 있다.

$$t_j \geq \max(t_e, t_m) \quad (4)$$

이 관계를 이용해 인치웸 구동기의 속도를 증가시키려면 일반적으로 d_i 는 가능한 크게, t_j 는 작게 디자인 해야 하며 한 사이클 동안 실제 확장/축소 구동의 비율의 크게 되도록 구동 논리를 설정하여야 한다.

3. 실험용 인치웸 구동기의 구동

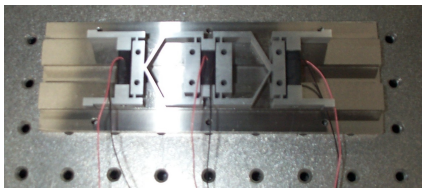
3.1 실험용 인치웸 구동기의 제작

실험용 인치웸 구동기는 그림 3과 같이 모두 3종류를 제작하였으며 구동 논리는 그림 4와 같다. 시작품 1은 그림의 좌측과 우측에 클램프 구동용 압전소자가 있고, 가운데 부분에 균일한 이송을 할 수 있도록 두 개의 확장/축소 구동용 압전소자가 병렬로 연결되어 있다. 왼쪽의 클램핑 블록은 고정되어 있다. 구동 논리를 통해 가로축을 이송시키며 스테이지는 이 축에 연결된다. 시작품 2는 좌,우측에 클램프 구동용 압전소자가 있고, 가운데 부분에는 하나의 확장/축소 구동용 압전소자가

있으며, 클램프 구동은 레버 메커니즘을 사용하여 2배, 확장/축소 구동은 무니 메커니즘을 사용하여 기구적으로 4배 확대하도록 하였다. 이 형태는 인치웜 구동기 자체가 스테이지 내부의 도관을 통해 움직이며 구동기에 스테이지 상판이 연결 되는 구조이다. 시작품 3은 시작품 2와 구성은 같으나, 확대/ 축소 구동에 기구적인 변위 증폭 대신 대변위 압전소자를 사용하였다. 시작품 3도 시작품 2와 마찬가지로 인치웜 구동기가 스테이지 내부를 통해 움직이는 형태이다. 이와 같이 시작품 2와 3에서 클램프 구동의 변위 확대를 하는 것은 가공 오차가 있을 때도 도관내에 고정 가능하도록 하기 위해서이다.



(a) 시작품 1 (size: width 115 mm x height 132 mm)

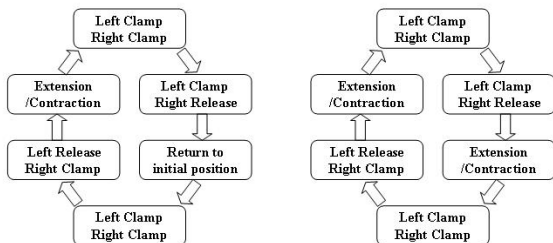


(b) 시작품 2 (size: length 128mm x width 40 mm)



(c) 시작품 3 (size: length 115mm x width 40 mm)

그림 3. 개발된 인치웜 구동기



(a) 시작품 1,3 (b) 시작품 2

그림 4. 인치웜 구동기 구동 논리

3.2 실험용 인치웜 구동기의 구동

인치웜 구동기의 구동장치는 그림 5 와 같으며, 통상 식 (5)와 같이 P 제어를 사용한다. 압전체의 제어에서는 P 제어만을 사용하여도 명령을 잘 추종하고 히스테리시스에 강인한 것으로 알려져 있다^[7]. 그림에서 Clamping Logic 부분은 그림 4 에서 표시된 구동 논리가 탑재되는 부분이며 Speed Curve Generator 는 통상적인 모션 제어기에서와 같이 위치명령을 발생시키는 부분이다. D/A 에서 출력된 신호는 전압 앰프를 통해서 인치웜 구동기를 구동하는데, 특히 확장/축소 구동 액추에이터는 고정밀 앰프를 사용하여 구동하여야 한다. 위치센서로는 깎 센서, 레이저 인터페로미터, 엔코더 등을 사용할 수 있다.

$$V = \sum C \cdot (P_{com} - P) \tag{5}$$

V : Output voltage
 C : Gain
 Pcom : position command
 P : position

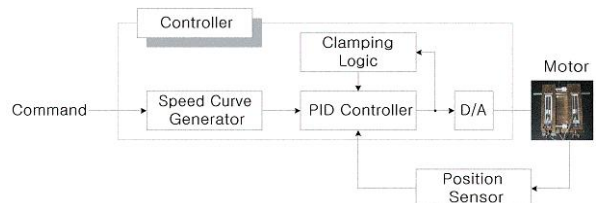


그림 5. 인치웜 구동기의 구동 장치

4. 실험

실험 장치는 그림 6과 같이, 제작된 구동기를 모니터용 상위제어기에 연결하여 구성하고 레이저 변위계를 사용하여 이송 속도를 측정하였다. 이송속도는 개회로 (Open loop) 상태에서 측정하였으며 실제 스테이지의 정밀 위치 제어에서는 레이저 인터페로미터를 사용하여 폐회로 (Closed loop)로 구성한다. 표 1은 실험 결과를 정리한 것으로 이송속도는 시작품 1,2,3 에서 각각 1.5 mm/s, 8.2 mm/s, 10.2 mm/s 였다. 이는 예측치인 1.8 mm/s, 10 mm/s, 15 mm/s 보다 항상 작은 값으로서, 이는 고속으로 구동시, 클램프 부분의 미끄러짐 등의 요소가 모델링에는 반영이 되지 않았기 때문이며, 구동 속도에 관계 없이 클램핑 구동시 전체 구동기에 약간의 변형이 생기는 원인도 있다. 구동기의 출력은 약 10 N

이며 행정거리는 시작품 1,2,3이 각각 50 mm, 50 mm, 100 mm 이다. 그림 7은 레이저 인터페로미터를 사용한 시작품 3의 폐회로 제어 파형으로 50 nm 스텝명령 추종 파형이다. 추종 특성 측정은 별도의 인터페로미터를 사용하여 측정하였으며 구동기의 분해능이 측정용 인터페로미터의 분해능인 9.8 nm 이내임을 알 수 있다.

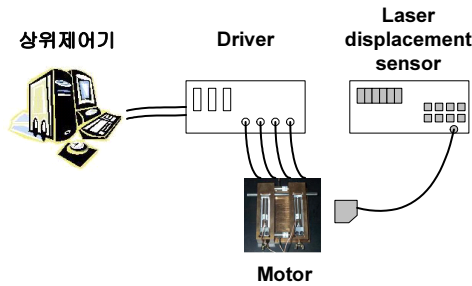


그림 6. 인치웜 구동기의 실험 장치 구성도

표 1. 구동 실험 결과

Maximum Speed	
Prototype 1	1.8 mm/s (expected)
	1.5 mm/s (experimental)
Prototype 2	10 mm/s (expected)
	8.2 mm/s (experimental)
Prototype 3	15 mm/s (expected)
	10.2 mm/s (experimental)
Commercial inchworm	1.5 mm/s
Output force	
Prototype 1	10 N
Prototype 2	10 N
Prototype 3	10 N
Commercial inchworm	10 N
Travel	
Prototype 1	50 mm
Prototype 2	50 mm
Prototype 3	100 mm
Commercial inchworm	50 mm

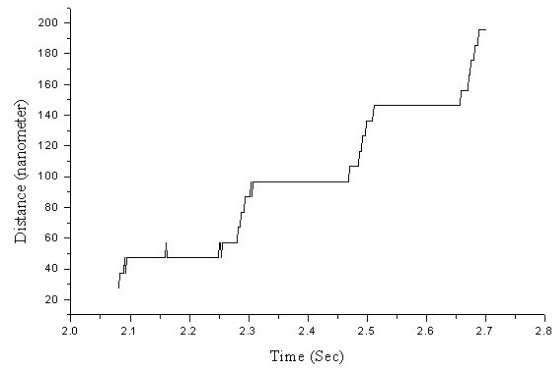


그림 7. 시작품 3의 폐회로 제어 파형

5. 결론

본 논문에서는 압전 소자를 사용하여 세 종류의 인치웜 타입 구동기를 개발하고 상위 위치 제어장치와 접속하여 시스템을 구성할 수 있도록 전용 제어기를 구현하였다. 인치웜 타입의 구동기는 충분한 추력을 발생시킬 수 있고, 나노미터 수준의 제어가 가능한 장점이 있는 반면, 이송속도가 느린 단점이 있어 수십 cm 이상의 긴 행정거리를 갖는 스테이지를 구성하는데 전자기형 구동기에 비해 불리하다. 여기서는 인치웜 구동기의 속도 모델을 제안하고, 분석적인 방법으로 속도를 해석하였으며, 이를 바탕으로 개선된 속도 특성을 갖는 인치웜 구동기의 설계에 반영하였다. 개발된 인치웜 구동기 중 시작품 3은 최대 10.2 mm/s 의 속도를 얻을 수 있었다. 인치웜 구동기의 성능 지수는 속도 만이 아니며, 다른 응용에서는 구동기의 추력을 더 중시하는 경우도 있다. 개발된 구동기의 추력은 약 10 N 정도로 상대적으로 부하가 적은 스테이지의 고속 정밀 동작용으로 적합하다.

참고문헌

- [1] 권대갑, 김승우, 김수현, “나노 구동 및 측정 시스템 설계”, KAIST 2002 산학 협동단기 강좌 교재.
- [2] “IW-800 Series Inchworm Motor, Stages, And Accessories Operating Manual”, Burleigh Instruments, Inc, 2000.
- [3] Bi Zhang, Zhenqi Zhu, Developing a Linear Piezomotor with Nanometer Resolution and High Stiffness. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics

- 1997; Vol. 2, No. 1, pp22-29.
- [4] Jun Ni, Zhenqi Zhu. Design of a Linear Piezomotor with Ultra-High Stiffness and Nanoprecision. IEEE/ASME Transaction on Mechatronics 2000; Vol. 5, No. 4, pp441-443.
- [5] Jeremy Frank, Gary H. Koopmann, Weiching Chen, George A. Lesieutre. Design and Performance of a High Force Piezoelectric Inchworm Motor. SPIE Conference on Smart Structures and Integrated Systems 1999; pp717-723.
- [6] Physik Instrumente Catalogue, Physik Instrumente, 1998.
- [7] Motoya Taniguchi, Minoru Ikeda, Akira Inagaki and Ryuichi Funatsu, "Ultra Precision Wafer Positioning by Six-axis Micro-motion Mechanism", Int. J. Japan Soc. Prec. Eng., Vol.26, No. 1, 1992 Mar.



문 찬 우

- 1989 서울대학교 제어계측공
학과(공학사)
- 1991 서울대학교 제어계측공
학과(공학석사)
- 2001 서울대학교 전자공학부
(공학박사)

2006~현재 국민대학교 전자공학부

관심분야 : Mechatronics