

이송 자벌레로의 압전소자 응용

윤재현*(금오공대 대학원 기전공학과), 채재희(오리온전기), 김인수(금오공대 기계공학부)

Application of Piezoceramic Actuator for Inch-Worm

J. H. Yoon*(mech. eng. dept., KNUT), J. H. Chae(orion electric co.), I. S. Kim(mech. eng. dept, KNUT)

ABSTRACT

This paper presents the new linear motion device so called "inch-worm" which gets large displacement by incrementally summing small displacements of PZT actuators. Dynamics stiffness of inch-worm is generally low compared to its driving condition due to the requirement of inch-worm like small size and light weight. This low stiffness may degenerate the positional precision of inch-worm.

An inch-worm is realized using three PZT actuators, a monolithic moving device and a guide way frame. Driving input signal is shaped to reduce the residual vibration of inch-worm by LQG controller and cycloid step input. The practical feasibility of inch-worm is also examined by running tests.

Key Words : Inch-Worm(이송 자벌레), Driving Input Shaping(구동 입력 설계), Residual Vibration(잔류 진동)

1. 서론

압전소자의 응용기술은 압전재료가 가지는 고유한 특성으로 인하여 압전소자의 정 방향 압전현상을 이용한 센서 개발과 역 방향 압전현상을 이용한 작동기 개발이라는 두 가지 방향으로 발전되어 왔다 [1-3].

최근 압전 작동기를 이송자벌레라는 새로운 개념의 고정밀도의 이송장치에 응용하려는 연구가 주목을 받고 있다. 이 장치는 다수의 압전 작동기의 변형운동을 관련 이송기구로 결합시켜 순차적인 이송 사이클 운동을 이루도록 한 것이다.

본 논문에서는 3개의 적층형 압전 작동기와 관련 이송기구를 결합시켜 고정밀도의 선형운동 기능을 부여한 이송자벌레를 소개한다. 또한 동적 특성을 실험을 통하여 규명함으로써 압전 작동기의 변형 출력이 이송력으로 효율적으로 변환되어 원활한 이송이 이루어질 수 있는지를 확인하기로 한다.

2. 이송자벌레 구성

2.1 이송자벌레 작동원리

이송자벌레는 다수의 압전 작동기의 조합으로 구

성된다. Figure 1은 본 연구에서 채택한 이송자벌레의 작동원리에 대한 개념도를 보인 것으로서 이송자벌레는 추진장치와 잠금장치로 구성된 이송부 및 이송 가이드로 이루어진다. 다시 잠금장치는 전단과 후단으로 구성된다.

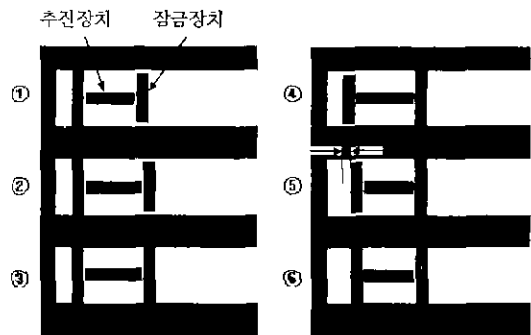


Fig. 1 Schematic diagram of inch-worm

이송 자벌레의 구동단계는 Figure 1과 같이 여섯 단계로 이루어진다.

1) 먼저 전단 작동기에 인가되었던 전압을 제거한다.

- 2) 추진 작동기에 전압을 가한다.
- 3) 전단 작동기에 전압을 가한다.
- 4) 후단 작동기의 인가 전압을 제거한다.
- 5) 추진 작동기의 인가 전압을 제거한다.
- 6) 마지막으로 후단 작동기에 전압을 인가함으로써 추진장치의 변형량 만큼 이동하는 한 이송 사이클이 완료된다.

2.2 이송 자벌레 설계

Figure 2는 설계된 이송 자벌레의 이송부이다. 재질은 스테인레스강이고 내장된 압전 작동기의 출력에 맞는 적당한 강성과 파손방지기능을 갖도록 설계되었다.

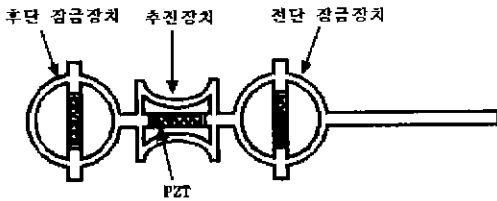


Fig. 2 Schematic diagram of feeding mechanism

압전 작동기(Sumitomo PSA15C)는 길이 21mm, 150층의 PZT압전 소자를 적층한 것으로 정전용량이 900nF, 최대 출력 힘은 700N, 최대 유효 변위는 20 μ m이다^[4]. Figure 3는 가이드와 이송부를 결합한 실험 사진이다. 양 잠금장치와 가이드의 간극은 3 μ m이내를 유지하도록 하였다.

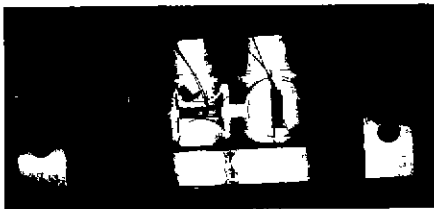


Fig. 3 Assembly of inch-worm

3. 유한요소해석

설계된 잠금장치 및 추진장치 기구의 압전 작동기에 의해 변형된 형상을 예측하고 또한 적절하게 구동될 수 있는지 확인하고자 유한요소해석 상용프로그램(ANSYS)을 이용하여 이송부의 정적해석을 수행하였다. 정적해석을 통해 얻어진 잠금장치의 스프링 계수는 0.42(N/ μ m), 추진장치의 스프링 계수는 2.12(N/ μ m)이다. 이송자벌레는 하나의 이송 사이클에 의한 이송거리가 μ m 단위이므로 고속

구동이 불가피하며 이에 따라 유한요소 모드해석을 통하여 이송자벌레의 동적거동을 파악하였다. 모드 해석 시에 이송부는 SOLID요소로 모델링되었고 후단 잠금장치의 양 끝단은 고정시켰다. 500Hz이하에서는 5가지의 굽힘모드 및 비틀림모드가 존재하였고 길이방향 인장모드는 535Hz 및 967Hz에서 발생됨을 알 수 있었다(figure 4 참조). 길이방향의 인장모드는 다른 모드들에 비해 이송정밀도에 미치는 영향이 크게 되므로 구동입력 신호는 인장모드 진동 저감을 고려하여 설계하여야 한다.

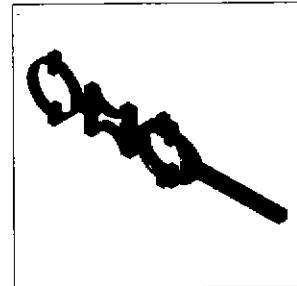


Fig. 4 Mode shape of inch-worm(535Hz x-x extending)

4. 실험 및 실험결과

4.1 이송자벌레 진동실험

설계, 제작된 이송 자벌레의 구동실험을 위하여 Figure 5에 보인 실험 장치를 구성하였다.

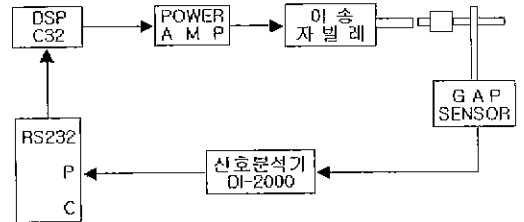


Fig. 5 Experimental set-up

이송방향의 인장모드로 인하여 유발되는 진동은 이송자벌레의 고속이송 시에 이송 정밀도의 저하를 가져온다. 구동 입력신호 파형의 적절한 설계로부터 이 같은 문제점의 해결방안을 위해 진동실험을 능동 제어를 통해 수행했다. 잔류진동 측정은 후단 잠금장치를 이송가이드에 고정시키고 전단 잠금장치는 분리시킨 상태에서 추진장치만을 인장 및 수축시키며 수행했다.

시스템의 수학적 모델링은 주파수 응답함수에 기초한 커브피팅(curve fitting)으로 규명했고 제어기

구성은 LQG이론을 적용했다(Figure 6 참조). 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 최적의 $u(k)$ 를 추출하여 이송자 발레추진장치에 입력으로 적용했다. Figure 7은 제어 전,후의 주파수 응답함수를 보인 것이다.

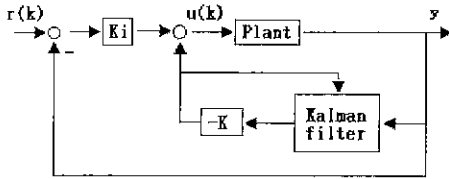


Fig. 6 Block diagram of the control system

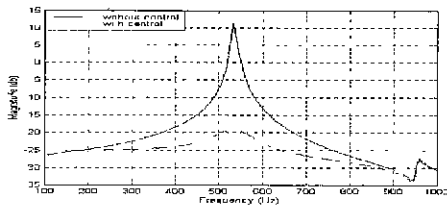


Fig. 7 Frequency response function with and without control

Figure 8은 구동신호로서 계단입력을 사용하였을 때의 이송자발레의 변위를 보인 것으로서 잔류 진동에 의한 최대 변위 진폭이 $7\mu\text{m}$ 이고 진동 지속시간이 0.1초 이상임을 알 수 있다. Figure 9는 LQG 제어기법에 의한 잔류 진동이 최소화 되도록 제어된 구동 신호와 변위를 보인 것이다. 변위의 최대 진폭은 $4\mu\text{m}$ 정도이며 정착지속 시간은 제어되지 않은 입력과 많은 차이 없이 0.1초 이상임을 볼 수 있다.

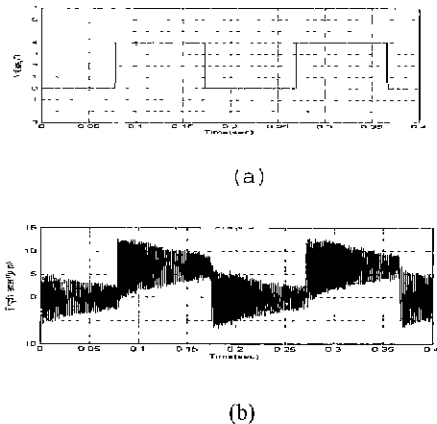


Fig. 8 Response of inch-worm using step input, (a) input, (b)displacement

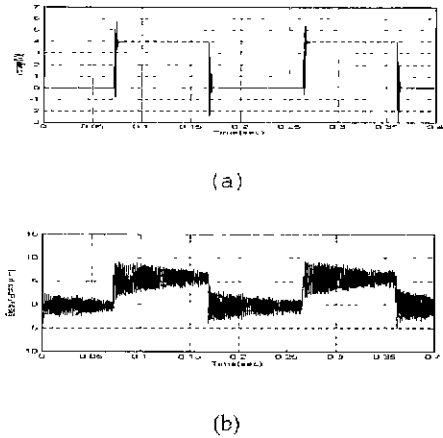


Fig. 9 Response of inch-worm using controlled step input. (a) step input, (b)displacement

잔류진동을 저감시키기 위한 다양한 구동입력신호 설계방안들이 문헌을 통해 발표되어 왔다. 사이클로이드(cycloid) 또는 역-사인파(versed sine)와 같이 구동신호의 증가 또는 감소과정에서 가속도 변화가 매끄럽게 이루어지도록 한 구동신호를 이용하는 것도 그 중 하나이다^[5]. Figure 10은 사이클로이드(cycloid) 구동신호와 변위를 보인 것이다. 잔류진동의 최대 변위 진폭은 $2\mu\text{m}$ 정도이며 정착시간은 0.1msec 이내임을 알 수 있고, Figure 11은 LQG 제어기법에 의해 얻어진 사이클로이드 구동신호와 변위를 보인 것이다. 잔류진동 최대 변위진폭이 $1\mu\text{m}$ 이하로 유지되고 정착시간도 상당히 짧아 계단입력의 경우에 비해 좋은 응답을 확인할 수 있다. 사이클로이드 신호의 상승시간은 인장모드의 고유진동수를 고려하여 1.38msec로 설정하였다.

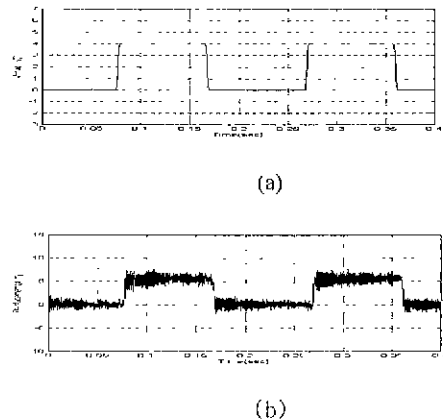


Fig. 10 Response of inch-worm using step input having a cycloid front in 1.38msec, (a)input, (b)displacement

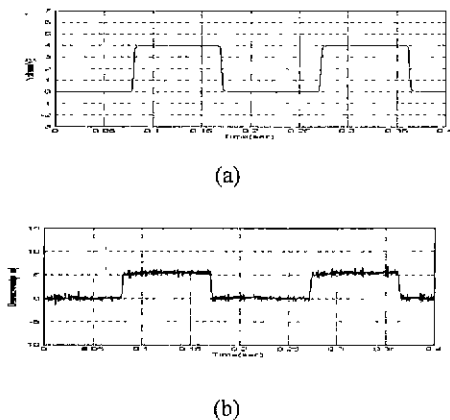


Fig. 11 Response of inch-worm using controlled step input having a cycloid front in 1.38msec. (a)input, (b)displacement

4.2 이송 자벌레 이송실험

Figure 12(a)은 이송속도 $13\mu\text{m}/\text{sec}$ 로 이송한 결과로서 추진장치와 전·후단장치의 압전 작동기에는 100V의 구동 펄스 신호를 입력하였다. 이송 사이클마다 $4.78\mu\text{m}$ 의 이송과 $1\mu\text{m}$ 이내의 진동이 수반됨을 알 수 있다. Figure 12(b)은 이송속도 $285\mu\text{m}/\text{sec}$ 로써 구동신호를 구동장치에 입력했을 때의 이송 자벌레의 이송 모습이다. 전·후단 잠금장치에는 100V, 추진장치에는 70V를 인가하였다. 두 경우 모두 이송정밀도 $1\mu\text{m}$ 이내의 원활한 이송이 이루어지고 있음을 알 수 있다.

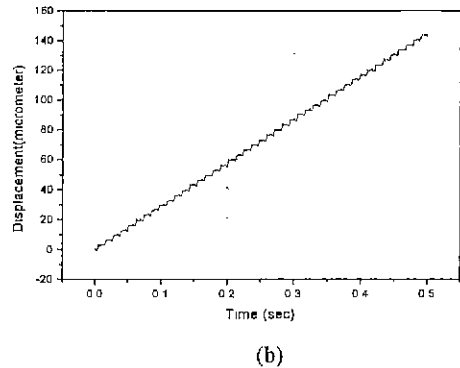
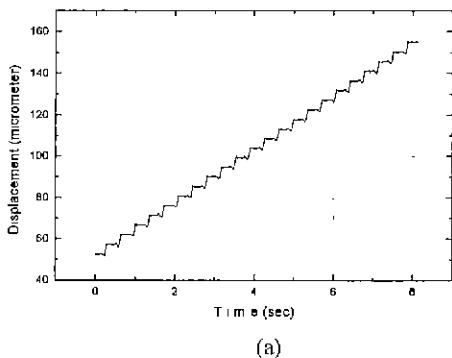


Fig. 12 Experimental result for displacement of inch-worm, (a) feedrate = $13\mu\text{m}/\text{sec}$, (b) feedrate = $285\mu\text{m}/\text{sec}$.

5. 결론

1) 구현된 이송 자벌레는 이송정밀도 $1\mu\text{m}$ 이내, 이송거리 35mm, 이송 속도는 300mm/sec 이상의 정밀 선형 이송장치로서 응용 가능하다.

2) 이송자벌레의 잔류진동은 이송 속도 및 정밀도에 심각한 제한을 줄 수 있다. 이러한 문제의 해결 방안으로 사이클로이드 계단신호에 LQG제어기법을 적용하여 계산된 구동 입력신호를 사용하는 것이 이송 자벌레 잔류진동의 효율적 제어 방안으로 사료된다.

참고문헌

1. S. Takahashi, "Recent Delvelopments in Multilayer Piezoelectric Ceramic Actuators and Their Applications," *Ferroelectrics*, Vol. 91, pp. 292-302, 1989.
2. M. J. Balas, "Trend in Large Space Structure Control Theory: Fondest Hopes, Wildest Dreams," *IEEE Trans. on Automatic Control*, Vol Ac-27, pp. 522-535, 1982.
3. 김영식, 이철, 김인수, "압전작동기/감지기를 이용한 혼합형 능동제어 기술," *한국소음진동공학회지* 제10권 6호, pp.1048-1058, 2000.
4. Sumitomo Metal Products, Ltd., *Piezo Electric Products*, Kanagawa Pref. 213 Japan, 1996.
5. D. M. Aspinwall, "Acceleration Profiles for Minimizing Residual Response," *Journal of Dynamic System, Measurement, and Control*, Transactions of the ASME, Vol. 102, pp.3-6, 1980.