

이송자벌레로의 압전세라믹 작동기 응용

김인수*, 이홍식**, 송준엽***

Application of Piezoceramic Actuator to the Inch-Worm

Insoo Kim*, Hongsik Lee**, Junyeob Song***

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. Dynamic 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. Finite element method and experimental approach are used to analyse the static and dynamic motion of the designed inch-worm. Command reference input is shaped to reduce the residual vibration of inch-worm. The practical feasibility of inch-worm is also examined by running tests.

Key Words : Inch-Worm(이송 자벌레), Finite Element Analysis(유한 요소 해석), Driving Input Shaping(구동 입력 설계), Residual Vibration(잔류 진동)

1. 서론

역방향 압전현상은 압전소자 양단에 전기장을 가하면 재료 내부적으로 전기적 극성화가 유도되고 이에 따라 기계적 변형이 발생하는 것으로서 이것의 응용사례로는 지능구조물, 압전 가진기, 압전 모터 등이 있다^[1-3]. 압전 작동기는 기존의 동력 발생장치인 전기 모터에 비해 구조가 간단하여 저렴하게 제작할 수 있고 응답속도가 빨라 고속구동이 가능하고 고체변형 에너지를 이용하므로 단위 체적당의 출력 에너지 밀도가 높아 소형 경량의 작동기로도 고출력을 발생시킬 수 있다^[4,5]. 압전 작동기

의 응용 한계는 대부분 압전재료 자체의 특성에 기인하는 것으로 압전 작동기에 대한 연구결과에 의하면 이같은 응용한계는 상당부분 극복될 수 있음을 보이고 있다. 예를들면 고체상태의 변형한계로 인하여 통상의 압전재료의 변형량은 마이크로 미터 단위의 극히 미소한 범위에 머물러 있으나 MLCC(multilayer chip capacitor) 적층기법을 통하여 작동기의 변형량을 수십배 증가시키는 방안이 제시되고 있다^[6,7].

최근 압전 작동기를 이송자벌레라는 새로운 개

2001년 1월 12일 접수

* 금오공과대학교 기계공학부

** 금오공과대학교 기전공학과 대학원

*** 한국기계연구원 자동화연구부

님의 이송장치에 응용하려는 연구가 주목받고 있다. 이같은 응용은 단순히 압전 작동기의 변형량만에 의존하는 기존의 압전 작동기의 응용사례와는 판이하게 다수의 압전 작동기의 변형운동을 관련 이송기구로 결합시켜 순차적인 이송 사이클 운동을 이루도록 한 것이다. 이에 따라 이송자벌레의 이송 거리는 이송 사이클을 단순히 반복함으로써 얻어질 수 있으며 작동기의 변형량은 이송 분해능에만 관계된다.

O'Neill^[8]은 외곽 실린더내에 적층형 압전소자를 이용한 2개의 디스크와 1개의 연결 봉을 구성하였고 구성요소의 순차적인 압축, 인장작용을 반복함으로써 실린더 내를 이동할 수 있는 기능을 부여하였다. Stafenberg^[9]는 압전소자의 원주방향 인장을 통하여 회전력을 발생시킴으로써 직선운동과 회전운동이 가능한 추진형 이송장치를 설계하였다. Pandall^[10]은 VLSI 제조공정에 사용하기 위하여 5세트의 적층 압전소자를 이용하여 직선 가이드면에 대하여 자벌레운동 기능을 부여하였다. 이 밖에도 직선 이송기구로서 압전 소자의 전후에 질량을 부착시키고 충격 구동 방식을 이용하여 마찰면에서 직선 이동을 행하는 기구 등이 있다^[11].

이송자벌레 기구는 소형 경량화가 요구됨으로 인하여 구동조건에 비해 기계적 강성에 상당한 한계가 있게 된다. 이에 따라 이송자벌레의 정밀도 및 안정성의 향상과 고속구동을 위해서는 적절한 진동저감 방법이 요구된다. 구동입력 설계 기술이 진동 저감을 위해 자주 사용되는 방법으로서 이것의 사례로는 고유 진동수 부근의 주파수를 여과시켜 잔류 진동을 줄이면서 최소시간에 운동을 완성할 수 있는 구동입력 설계기법, 구동 입력신호를 유향계의 후리에(Fourier) 급수로 전개하여 넓은 범위에서의 주파수 성분을 최소화시키는 구동입력 설계기법 등이 있다^[12, 13].

본 논문에서는 3개의 적층형 압전 작동기와 관련된 이송기구를 결합시켜 고 정밀도의 선형운동 기능을 부여한 이송자벌레를 구현하기로 한다. 또한 설계된 이송자벌레의 정적 및 동적 특성을 유한요소해석을 통하여 규명함으로써 압전 작동기의 변형 출력이 효율적으로 이송력으로 변환되어 원활한 이송이 이루어질 수 있는지를 확인하기로 한다. 아울러 이송자벌레의 진동실험 및 이송실험을 통하여 후리에 급수 전개법 등에 의해 설계된 구동 입력신호를 이용하는 경우 이송과정 중에 발생

하는 이송부의 잔류 진동이 저감될 수 있는지의 여부와 향후 정밀 이송장치로서의 이송자벌레 응용 가능성을 검증하고자 한다.

2. 이송자벌레 구성

2.1 이송자벌레 작동원리

압전소자의 고체 유도변형량은 수 마이크로미터 이하이고 압전소자를 직렬로 쌓아올린 적층형 압전소자의 경우에도 최대 변형량은 수십 마이크로미터 이하이다. 이에 따라 단순히 압전소자 변형량에만 의존하는 이송 메카니즘(mechanism)으로는 수십mm 이상의 대 변위 이송범위를 갖는 선형이송장치를 구성할 수 없다. 이같은 한계를 극복하고 이송장치에 압전소자를 응용하기 위한 방안으로써 압전소자에 이송 가이드면을 따라서 마찰력을 이용하여 벌레가 기여가는 것과 같은 운동기능을 부여한 것이 이송자벌레이다.

이송자벌레 구성을 위해서는 다수의 압전 작동기의 운동을 조합하여 이송운동으로 변환하는 이송 기구가 필요하다. Figure 1은 본 연구에서 채택한 이송자벌레의 작동원리를 보인 것으로서 이송자벌레는 추진장치와 잠금장치로 구성된 이송부 및 이송 가이드(guide)로 이루어진다.

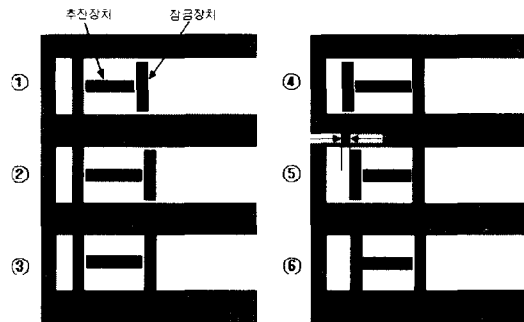


Fig. 1 Schematic diagram of inch-worm

추진장치는 압전 작동기를 내장시키고 이를 이용하여 수축 및 인장 변형을 반복시킴으로써 자벌레운동과 같이 가이드면을 따라서 이송운동을 발생시키는 장치이다. 잠금장치는 추진장치의 전단부 및 후단부를 독립적으로 고정시키기 위하여 동일기능을 갖는 2개의 장치(전단, 후단 잠금장치)

로 구성되며 이것의 작용력은 역시 잠금장치에 내장된 압전 작동기로부터 얻어진다. 이것은 추진장치를 가이드 벽면에 강제적으로 접촉시키거나 분리시키는 작용을 하는 것으로서 결과적으로 추진장치에 걸려있는 부하하중에 관계없이 추진장치에 요구되는 추진력을 부가, 유지시키는 기능을 한다. 이송자벌레의 구동 단계는 Figure 1과 같이 여섯 단계로 나눌수 있다. 먼저 전단 작동기에 인가되었던 전압을 제거하여 전단 잠금장치를 이송가이드로부터 분리시킨다. 추진 작동기에 전압을 가해주면 추진장치는 인장되고 이에 따라 추진장치의 끝단은 우측으로 이동하게 된다. 전단 작동기에 전압을 가하여 전단 잠금장치를 이송가이드에 고정시킨다. 후단 작동기의 인가전압을 제거하여 후단 잠금장치를 이송가이드로부터 분리시킨다. 추진 작동기의 인가전압을 제거하여 추진장치를 수축시킨다. 후단 작동기에 전압을 인가함으로써 이송자벌레는 하나의 이송 사이클을 완료한다.

2.2 이송자벌레 설계

Figure 2는 설계된 이송자벌레의 이송부를 보인 것으로서 3개의 동일 압전 작동기에 의해 구동되도록 하였고 단순 형태를 이루도록 하였다. 이송부의 추진장치 기구는 스테인레스강을 이용하여 제작하였고 내장된 압전 작동기가 충격 및 전단력에 의해 파손됨을 방지하고 압전 작동기의 변형출력 범위 내에서 원활한 신장 수축이 일어나고 적절한 강성 및 스프링 특성을 갖도록 반원형 스프링 외곽부를 설치하였다.

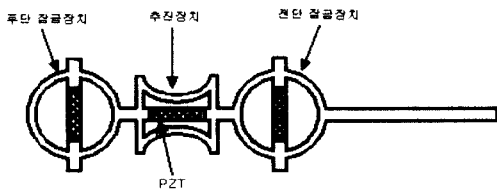


Fig. 2 Schematic diagram of feeding mechanism

추진장치 내의 압전 작동기는 압전소자의 변형 출력이 효율적으로 이송력으로 변환되도록 길이방향(이송방향)으로 설치하였다. 사용된 압전작동기는 전체길이가 21mm이고 150층의 PZT 압전소자를 적층한 것(sumitomo PSA15C)으로서 구체적 사

양은 Table 1과 같다¹⁴⁾.

Table 1 Specification of PZT actuator

Capacitance	nF	900 ± 20
Insulation Resistance	Ω	>10
Effective Displacement	μm	20
Max. Driving Field	V	150
Max. Output Force	N	700

잠금장치 기구는 원형으로 설계되었고 잠금장치에 내장된 압전작동기의 파손을 방지하고 이송가이드와의 접촉 및 이탈이 원활하게 일어나도록 스프링 특성을 갖게 하였다. 또한 압전작동기의 변형출력이 이송가이드에 직접 전달되게 함으로써 잠금장치가 충분한 고정력을 갖도록 압전작동기는 수직으로 배치하였다.

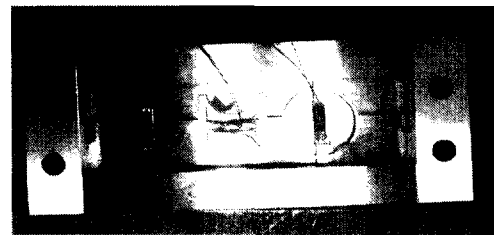
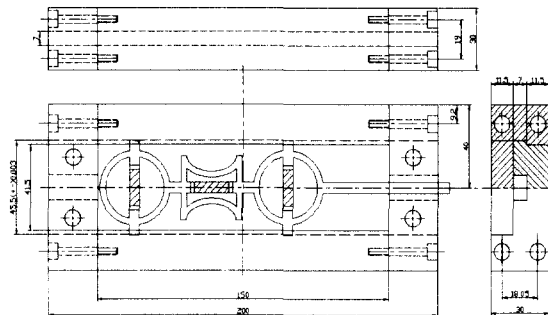


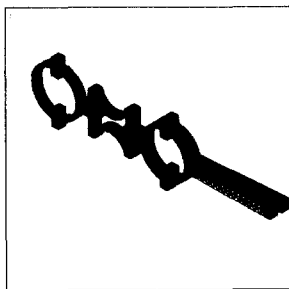
Fig. 3 Assembly of inch-worm

잠금장치의 끝단은 이송가이드와 빈번하게 마찰 접촉되므로 열처리를 통해 경도를 높였으며 잠금장치의 양끝단과 이송가이드 사이의 간극은 전 이

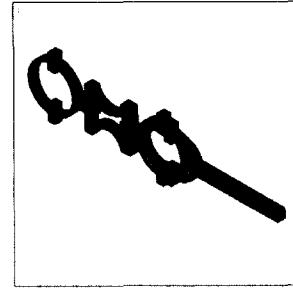
송범위에 대해 $3\ \mu m$ 이내로 유지하였다. 이송가이드는 이송부 조립을 용이하게 하고 미세 간극조정이 가능하도록 5개의 블럭으로 구성하여 볼트체결하였다. 잠금장치와 접촉되는 활동면은 L자형 홈을 이루도록 하여 이송부의 이탈 및 뒤튐림을 방지하도록 하였다. Figure 3은 이송자벌레의 설계도면 및 제작된 형상을 보인 것이다.

3. 유한요소해석

설계된 잠금장치 및 추진장치 기구의 압전 작동기에 의해 변형된 형상을 예측하고 또한 적절하게 구동될 수 있는지 확인하고자 상용프로그램(ANSYS)을 이용하여 이송부의 유한요소해석을 수행하였다¹⁵⁾. 정적해석을 통해 얻어진 잠금장치의 스프링 계수는 $0.42(N/\mu m)$, 추진장치의 스프링 계수는 $2.12(N/\mu m)$ 이다. 이송자벌레는 하나의 이송사이클에 의한 이송거리가 μm 단위이므로 고속 구동이 불가피하며 이에 따라 유한요소 모드 해석을 통하여 이송자벌레의 동적거동을 파악하였다. 모드해석 시에 이송부는 SOLID요소로 모델링되었고 후단 잠금장치의 양 끝단은 고정시켰다. 500Hz이하에서는 5가지의 굽힘모드 및 비틀림모드가 존재하며 길이방향 인장모드는 535Hz 및 967Hz에서 발생된다. 길이방향의 인장모드는 다른 모드들에 비해 이송정밀도에 미치는 영향이 크게 되므로 구동입력 신호는 인장모드 진동 저감을 고려하여 설계하여야 한다. Figure 4는 이송자벌레의 51Hz 굽힘모드와 535Hz 인장모드의 형상을 보인 것이다.



(a) 51Hz, bending mode



(b) 535Hz extending mode

Fig. 4 Mode shape of inch-worm

4. 실험 및 실험결과

4.1 실험장치

설계, 제작된 이송자벌레의 구동실험을 위하여 Figure 5에 보인 실험장치를 구성하였다. 이송자벌레는 다음과 같이 2단계 과정을 거쳐 구동되도록 하였다. 먼저 개인용 컴퓨터를 이용하여 이송속도 및 이송거리를 고려하여 하나의 이송사이클에 관련된 전, 후단 잠금장치 및 추진기용 구동신호를 생성하여 이산신호처리장치(DSP C32)에 전달한다. 이산신호처리장치는 전달받은 신호를 이용하여 전 이송거리에 필요한 구동신호를 반복적으로 생성하고 D/A변환시킨 후 파워증폭기(AVC 790A04)를 거쳐 이송자벌레에 장착된 세 개의 압전 작동기에 전달함으로써 이송자벌레를 구동시킨다.

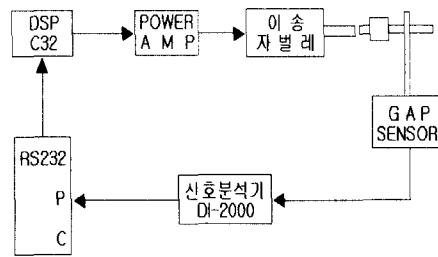


Fig. 5 Experimental set-up

이송자벌레의 변위 및 가속도는 캡센서(AEC 5706PS)와 가속도계(PCB 482A16)를 이용해 측정되고 신호분석기(DI 2200)를 통해 데이터로 저장되도록 하였다.

4.2 이송자벌레 진동실험

이송방향의 인장모드로 인하여 유발되는 진동은 이송자벌레의 고속이송 시에 이송 정밀도 저하를 가져올 수 있다. 구동 입력신호 파형의 적절한 설계를 통하여 이 같은 문제점의 해결방안을 모색하기 위하여 이송자벌레 진동실험을 수행하였다. Figure 6은 구동신호로서 계단입력을 사용하였을 때의 이송자벌레의 변위 및 가속도를 보인 것으로서 잔류진동에 의한 최대 변위 진폭이 7 μm이고 진동 지속시간이 0.1초 이상임을 알 수 있다. 잔류진동측정은 후단 잠금장치를 이송가이드에 고정시키고 전단 잠금장치는 분리시킨 상태에서 추진장치만을 인장 및 수축시키면서 수행되었다. 잔류진동을 저감시키기 위한 다양한 구동입력 신호 설계 방안들이 문헌을 통해 발표되어 왔다.

싸이클로이드(cycloid) 또는 역-싸인파(reversed sine)와 같이 구동신호의 증가 또는 감소과정에서 가속도 변화가 매끄럽게 이루어지도록 한 구동신호를 이용하는 것도 그 중 하나이다¹⁶⁾.

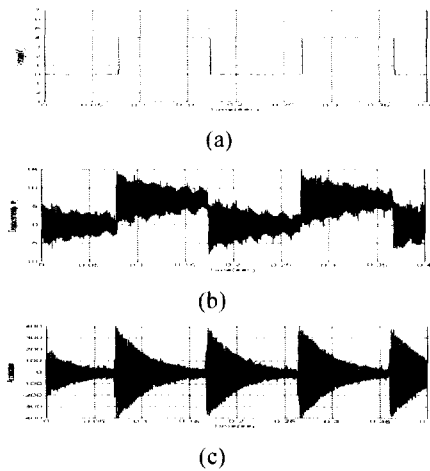


Fig. 6 Response of inch-worm using step input (a)input (b)displacement (c)acceleration

Figure 7은 싸이클로이드 구동입력신호를 이용한 경우 이송자벌레의 응답을 보인 것이다. 잔류진동 변위진폭이 2 μm이내로 유지되고 계단입력 경우에 비해 가속도는 1/4 정도로 줄었음을 알 수 있다. 싸이클로이드 신호의 상승시간은 인장모드의

고유진동수를 고려하여 0.00138초로 설정하였다. Figure 8은 유한 후리에 급수전개법을 이용하여 설계된 구동입력신호에 대한 이송자벌레 응답을 보인 것이다. 이송자벌레에 적용된 구동신호의 가속도는 $\sum_{i=1}^5 a_i \sin \frac{2\pi i t}{t_r}$ 로 표현되며 각 계수들은 Aspinwall¹³⁾에 의해 제시된 비 감쇠 1 자유진동계의 $f_n t_r > 5$ 이후의 (잔류진동 진폭)/(기준변위) < 10⁻⁶ 기준을 이용하여 결정하였다.

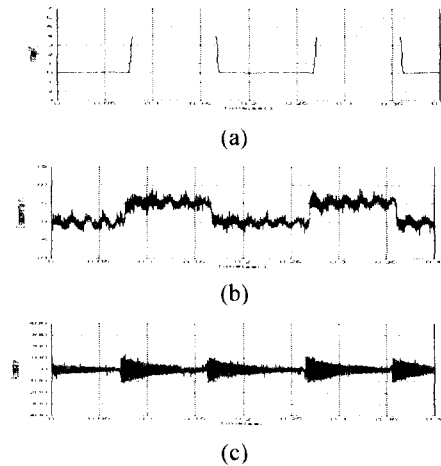
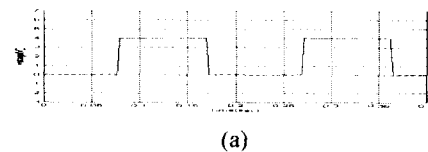


Fig. 7 Response of inch-worm using step having a cycloidal front in 1.38msec (a)input (b)displacement (c)acceleration

여기서 f_n = 고유진동수 (535Hz), t_r = 상승시간 (0.00138초)이다. Figure 8로 부터 유한 후리에 급수전개법에 의한 구동신호를 이용하는 경우가 싸이클로이드 신호의 경우에 비해 잔류진동 저감도가 우수하며 집센서의 분해능이 0.5 μm이고 60Hz 신호잡음 등을 고려 할 때 잔류진동 변위 진폭은 1 μm이내로 유지되고 있음을 알 수 있다.



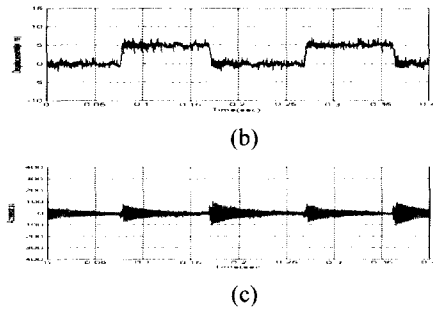


Fig. 8 Response of inch-worm using step having a Aspinwall front in 1.38msec
(a)input (b)displacement (c)acceleration

4.3 이송자벌레 이송실험

이송자벌레가 원활한 이송 싸이클을 실현하기 위해서는 이송부의 각 요소들이 별도의 지정된 시간에만 동작되도록 하여야 한다. Figure 9는 전, 후단 잠금장치 및 추진기의 구동신호들 사이에 유지되어야 할 시간간격의 기본형을 보인 것이다.

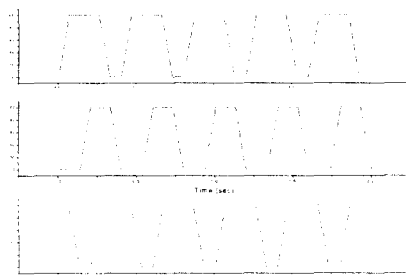
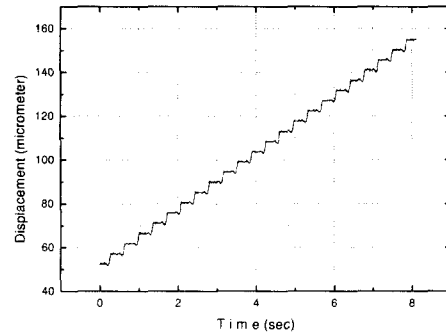


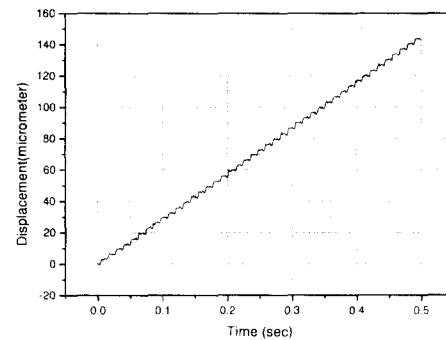
Fig. 9 Time chart of driving input signals of inch-worm

전진이송 시에 첫번째 신호는 후단 잠금장치 신호, 두번째 신호는 추진장치 신호, 세번째 신호는 전단 잠금장치 신호가 된다. 후진 이송 시에는 단순히 첫번째 신호와 세번째 신호의 순서를 바꿈으로써 이루어질 수 있다. 이송속도의 변동은 각 신호들의 주기 및 신호 크기의 변화를 통해 이루어진다. Figure 10(a)는 이송속도 13 $\mu\text{m}/\text{sec}$ 로 이송한 결과로서 추진장치 압전 작동기에는 100V의 구동펄스 신호를 입력하였다. 이송 싸이클마다

4.78 μm 의 이송이 발생되고 이송과정 중에 약간의($1 \mu\text{m}$ 이내) 이송부 진동이 수반됨을 알 수 있다. 사용된 압전 작동기의 유도 변위 분해능 = $0.0478 (\mu\text{m}/\text{V})$ 이고, 최대 인가전압은 150V이므로 이송거리 조정은 구동펄스 신호의 크기조정을 통해 기할 수 있다.



(a) feedrate=13 $\mu\text{m}/\text{sec}$



(b) feedrate=285 $\mu\text{m}/\text{sec}$

Fig. 10 Displacement of inch-worm

Figure 10(b)는 압전 작동기에 70V 구동펄스 신호를 이용하여 285 $\mu\text{m}/\text{sec}$ 이송속도로 이송한 결과를 보인 것으로서 고속 구동 시에도 이송 정밀도는 $1 \mu\text{m}$ 이내로 유지되고 있음을 알 수 있다. 이송가이드와 잠금장치 사이의 간극이 전 이송범위(35mm)에 대해 3 μm 이내임을 고려하여 전, 후단 잠금장치 압전 작동기에는 100V의 구동펄스 신호를 입력하였다.

5. 결론

3개의 적층형 압전 작동기와 관련 이송기구를 결합한 이송자벌레를 구현하여 구동실험을 한 결과 다음의 결론을 얻었다.

- 1) 구현된 이송자벌레는 이송 정밀도 $1\ \mu\text{m}$ 이내, 이송 거리 35mm, 이송 속도 $300\ \mu\text{m}/\text{sec}$ 이 상의 정밀 선형 이송장치로서 응용 가능하다.
- 2) 구동조건에 비해 기계적 강도가 낮음으로 인하여 발생하는 이송자벌레의 잔류진동은 이송 속도 및 정밀도에 심각한 제한을 줄 수 있다. 유한 후리에 급수전개법과 같은 진동저감을 기하도록 한 구동 입력신호 설계법이 상기 문제의 해결방안으로 이용될 수 있다.

후 기

본 연구는 1999년도 금오공과대학교 학술연구비에 의해 지원된 논문입니다.

참고문헌

1. S. Takahashi, "Recent Developments in Multilayer Piezoelectric Ceramic Actuators and Their Applications," *Ferroelectrics*, Vol. 91, pp. 292-302, 1989.
2. M.J.Balas, "Trends 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," *한국소음진동 공학회지* 제10권 6호, pp. 1048-1058, 2000.
4. C. Newcomb and I. Flinn, "Improving the Linearity of Piezoelectric Ceramic Actuators," *Electronics Letters*, Vol. 18., No. 11, pp. 442-443. 1985.
5. C.Liang, F.P. Sun and C.A.Rogers, "Coupled Electro-mechanical Analysis of Adaptive Material Systems Determination of the Actuator Power Consumption and System Energy Transfer," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 5, pp. 12-20, 1994.
6. J.A. Main, E. Garcia and D.V.Newton, "Precision Position Control of Piezoelectric Actuators Using Charge Feedback," *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, Vol.18, No.5, pp.1068-1073, 1995.
7. 김호기, 신병철, 압전·전왜 세라믹스, 반도체출판사, 서울, 1991.
8. G. O'Neill, "Electromotive Actuator," U.S. Patent:4,219,755, 1880.
9. C.W. Staufenberg, R.J.Hubbell, "Piezoelectric Electromechanical Translation Apparatus," U.S. Patent:4,622,483, 1986.
10. T.Pandall and E.Garcia, "Design of a Piezoelectric Caterpillar Motor," *Proceedings of ASME Aerospace Divison*, AD-Vol. 52, pp. 627-648, 1996.
11. L. Jones, E. Garcia and H. Waites, "Self-Sensing Control as Applied to a PZT Stack Actuator Used as a Micropositioner," *Smart Materials and Structures*, Vol.3, pp.147-166, 1994.
12. N. C. Singer and W. P. Seering, "Preshaping Command Inputs to Reduce System Vibration," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Transactions of the ASME, Vol. 112, 1990.
13. D. M. Aspinwall, "Acceleration Profiles for Minimizing Residual Response," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Transactions of the ASME, Vol. 102, 1980.
14. Sumitomo Metal Products, Ltd., Piezo Electric Products, Kanagawa Pref. 213 Japan, 1996.
15. (주)태성에스엔이, Dynamics for ANSYS 5.5 Training Manual, 1999.
16. Cyril M. Harris, Shock and Vibration Handbook, 4th ed, McGraw-Hill, 1997.