

유연 매체에 적용 가능한 Bimorph PZT 구동기의 설계 및 제어

심현재[†], 황현우*, 박노철**, 양현석***, 박영필****

Design and Position Control of Bimorph PZT Actuator for Flexible Media

H.J. Shim[†], H.W. Hwnag*, N.C. Park**, H.S. Yang***, Y.P. Park****

Key Words : 유연매체(flexible media), 간극 제어(gap control), Bimorph PZT

ABSTRACT

Nowadays, various approaches are performed to increase the storage capacity of optical storage device. One of the promising candidates is using the high NA lens. By using high NA lens, the beam spot size can be reduced which will lead to increase the storage density. This paper proposes a double cantilever beam type bimorph PZT actuator for fine motion that can control the gap between the flexible media and optical pickup which uses high NA lens. Mathematical model is derived by using Hamilton's principle and the model is verified by finite element analysis and experiment. Position controller is designed and its performance is evaluated by experiment.

1. 서론

현대 사회에서는 정보저장기기는 기하급수적으로 불어나는 정보량으로 인해 보다 높은 정보 저장 용량이 요구되고 있다. 더불어 보다 빠른 Access 속도와 휴대할 수 있을 정도 크기를 위한 소형화에 대한 수요 또한 증대되고 있다. 그러나 용량의 증대와 동시에 Access 시간의 감소와 소형화라는 다양한 요구를 충족하기에는 기존의 정보 저장 기기는 여러 한계에 부딪칠 수밖에 없다.

광 정보저장기기에서는 높은 NA(High-Numerical Aperture)의 렌즈를 통해 Spot size 를 감소시킴으로써 매체의 저장 밀도를 높이는 방법이 계속 연구되고 있다. 그러나 Spot size 를 감소시키기 위해 보다 높은 NA 의 렌즈를 사용 할수록 Working distance(WD) 는 더 감소하게 된다. 이렇게 좁아진 WD 에 대응하기 위해 유연 매체(flexible media)가 제안되었다.

유연 매체는 회전 시 큰 축 방향의 runout 을 가지게 되어서 WD 이상으로 벗어나거나 렌즈 헤드와의 충돌 등을 일으키게 된다. 그러므로 runout 의 감소를 위한 연구가 진행되고 있다. 현재까지 안정기(stabilizer)를 사용하여 축 방향의 runout 을 효과적으로 줄이는 연구가 진행되었다. 그러나 안정기를 사용하더라도 여전히 수 μm 의 runout 은 존재하게 되므로 유연 매체의 축 방향 runout 을 정밀하게 추종하기 위한 축 방향의 구동기의 개발이 요구되고 있는 상황이다.

본 논문에서는 빠른 응답 속도와 소형화가 가능하며 축 방향으로 움직이는 Cantilever Beam Type

[†] 연세대학교 기계공학과 대학원
E-mail : 2thebest@hanmail.net
Tel : 02)2123-4677

* 연세대학교 기계공학과 대학원
** 연세대학교 정보저장기기협동과정
*** 연세대학교 기계공학과
**** 연세대학교 기계공학과

Bimorph PZT 구동기를 제안하였다 Hamilton's principle 을 이용하여 구동기에 대한 수학적 모델을 도출하였고 이를 유한요소해석과 실험을 통해 타당성을 증명하였다. 이에 Lead-Lag Compensator 를 이용하여 제어기를 설계하고 이를 이용하여 제어 실험을 하였다.

2. 구동기 모델링

본 논문에서 제안한 유연 매체에 적용 가능한 구동기는 Fig. 1 에서 보는 것과 같이 2 개의 Bimorph PZT 를 S 자 형태로 구동되도록 구성되어 있다. 2 개의 Bimorph PZT 를 사용함으로써 시스템의 강성을 증가시켜 시스템의 공진 주파수를 높일 수 있다. 또한 S 자 형태로 구동됨으로써 PZT 의 단점인 히스테리시스 영향의 구조적으로 감소시킬 수 있다.⁽⁹⁾

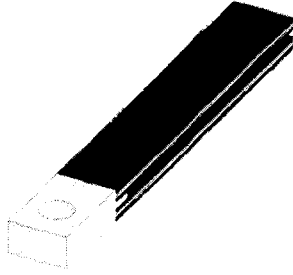


Fig. 1 Proposed Actuator

2.1 수학적 모델링

Fig.1 에서 PZT 구동기의 좌표계와 변수들을 정의하였다. 동적 모델은 탄성계수 E, 2 차 단면계수 I, 밀도 ρ , 단면적이 A 인 길이 L 의 보이며, 등가 질량 m 이 보의 끝단에 달려 있다.

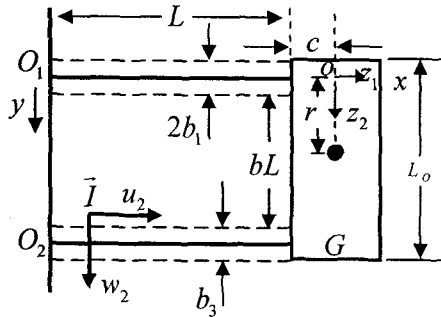


Fig. 2 Simple model for PZT actuator

2.1.1 에너지 방정식

보의 종방향 변위를 $u(x,t)$, 횡방향 변위를 $w(x,t)$ 라 하면, 보의 운동에너지와 위치에너지는 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_s = \int_b \frac{1}{2} \rho a (\dot{u}_s^2 + \dot{w}_s^2) dx_1, \quad s=1, 2 \quad (1)$$

$$V_s = \int_b \left(\frac{1}{2} EA u_2'^2 + \frac{1}{2} EI w_2''^2 \right) dx_1$$

또, 등가 질량 m 의 운동에너지와 위치에너지는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_3 = \frac{1}{2} m \dot{u}_1^2(l,t) + \frac{1}{2} m \dot{w}_1^2(l,t) + \frac{1}{2} (m c^2 + J) \dot{w}_1'(l,t) + c \dot{w}_1(l,t) \dot{w}_1'(l,t) - m r_1 \dot{u}_1(l,t) \dot{w}_1'(l,t)$$

$$V_3 = 0 \quad (2)$$

이 때 $J = \frac{m}{3} (c^2 + b_1^2 - b_1 b_2 + b_2^2)$ 이다.

2.1.2 Governing Equations and Boundary Conditions

에너지 방정식을 식(3)에 나타난 Hamilton's principle 를 이용하여 정리하면 지배 방정식(4)과 경계 방정식(5)를 유도하였다.

$$\int_1^2 (\delta V - \delta T) dt = 0 \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \rho A \ddot{u}_1 - EA u_1'' &= 0 \\ \rho A \ddot{w}_1 + EI w_1'''' &= 0 \\ \rho A \ddot{u}_2 - EA u_2'' &= 0 \\ \rho A \ddot{w}_2 + EI w_2'''' &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} [m \ddot{u}_1 - m r_1 \dot{w}_1' + EA u_1' + EA u_2']_{x_1=l} &= 0 \\ [m \ddot{w}_1 + m c \dot{w}_1' - EI w_1'''' - EI w_2''']_{x_1=l} &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

$$[(m c^2 + J) \ddot{w}_1' + m c \dot{w}_1 - m r_1 \dot{u}_1 - 2 r_1 EA b_2 + EA b_1' + EA b_2']_{x_1=l} = 0$$

$$[u_s = w_s = w_s]_{x=0} = 0, s = 1, 2$$

2.1.3 Separation of variables

길이 방향의 형상함수 $w(x,t)$ 와 폭 방향의 형상함수 $u(x,t)$ 는 모드 합성법을 이용하여 다음과 같이 표현된다.

$$u(x,t) = \sum_{i=1}^n U_i(x) q_i(t), \quad w(x,t) = \sum_{i=1}^n W_i(x) q_i(t)$$

여기서 형상함수를 균일 외팔보의 고유함수를 사용하여 나타내면 다음과 같다

$$U_s = B_s \sin \alpha x$$

$$W_s = a_{s1} [\cos \alpha x - \cosh \alpha x] + a_{s2} [\sin \alpha x - \sinh \alpha x]$$

$$s = 1, 2$$

$$\alpha^2 = \frac{\rho \omega^2}{E}, \quad \sigma^4 = \frac{\rho \omega^2 A}{EI}$$

이를 이용하여 주파수 응답 시뮬레이션을 하였다. 다음은 제안된 구동기에서 사용된 Bimorph PZT 의 물성치이다.

Table 1. Properties of Bimorph PZT

Property	Piezo Ceramic	Steel Shim
Density (kg/m ³)	7800	7800
Young's Modulus (N/m ²)	66 x 10 ⁹	200x10 ⁹
Thickness (mm)	0.6	
Width (mm)	3	
Length (mm)	15	

위 Table 1.에서의 물성치를 이용하여 앞서 도출한 수학적 모델을 이용하여 주파수 응답 해석을 하였고 LDV 와 DSA(Digital Signal Analyzer, Agilent 35670A)를 이용하여 주파수 응답을 실험적으로 구하였다. Fig. 3 은 수학적 모델과 실험을 통해 얻은 주파수 응답 결과이다.

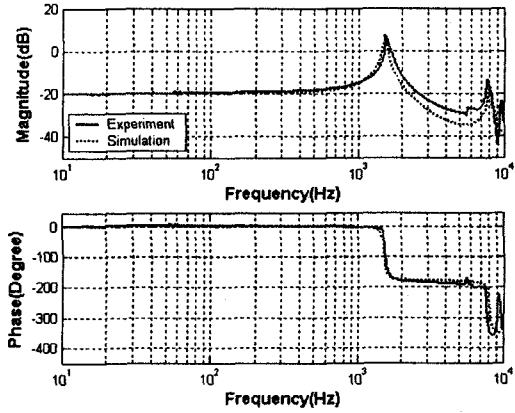


Fig. 3 Frequency Response of the Actuator

다음은 유한 요소 해석을 통해 얻은 모드해석 결과이다.

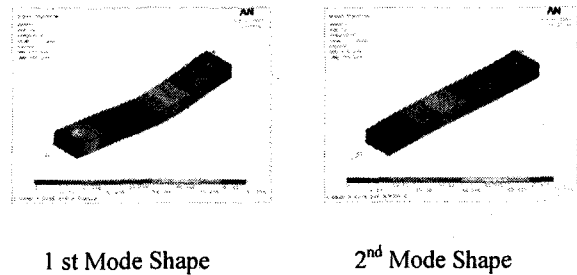


Fig. 4 FE Analysis Result using ANSYS

수학적 모델과 유한 요소 해석, 실험 결과가 모두 근사한 것을 알 수 있다.

Table 2. Comparison of Natural Frequency

	Theoretical Analysis	FE Analysis	Experiment
1 st Natural Frequency (Hz)	1520.4	1537	1538.2
2 nd Natural Frequency (Hz)	8023.5	8035	7677.1

3. 제어기의 설계

유연 매체에 적용 가능한 구동기에 대한 연구는 아직 초기 단계에 있고 특히 안정기의 성능과 밀접한 연관이 있으므로 안정기의 구동 속도에 맞춰 시스템의 대역폭을 500 Hz 로 정하였다. 그리고

안정기로 인해 미디어의 진폭이 10um 이내이므로 최대 진폭을 10um 으로 정하였다.

간극 제어를 위한 제어기를 다음과 같이 설계하였다. 본 연구에서 설계한 Bimorph PZT 구동기의 1 차 고유주파수는 1.6kHz 근방이다. 제어 시스템의 대역폭을 500Hz 로 한정하였기 때문에 구동에 있어 큰 영향은 없지만 보다 안정적인 구동을 위해 1 차 공진점을 Notch Filter 를 사용하여 소거하였다. 저주파수 대역에서 DC Gain 을 확보하기 위해 3Hz 근방에 극점을 배치하고 Lag Compensator 를 배치하였다. 그리고 위상 이득을 확보하기 위해 Cut-off Frequency 근방에서 Lead Compensator 를 추가하였다. 제어기의 전달 함수는 다음과 같고 전체 시스템의 Open-Loop 주파수 응답은 Fig. 5 와 같다.

$$C(s) = \frac{3.21 (s+870) (s+245) (s^2 + 431s + 9.857 \times 10^7)}{(s+2190) (s+29.6) (s^2 + 21.4s + 386)}$$

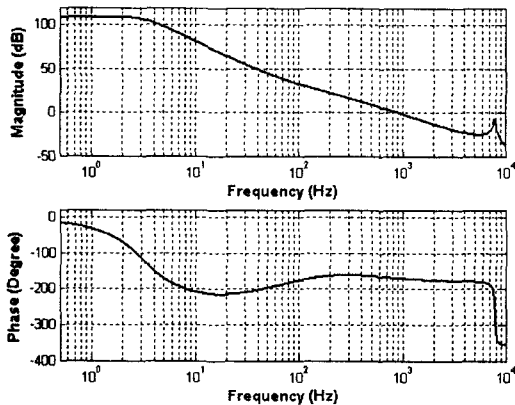


Fig. 5 Open Loop Bode Plot of Control System.

Table 3. Control System Margin

Gain Margin (dB)	18.6
Phase Margin (Degree)	10.4

4. 실험 및 결과

Fig. 6 은 본 논문에서 제안된 구동기의 실물 사진이다.

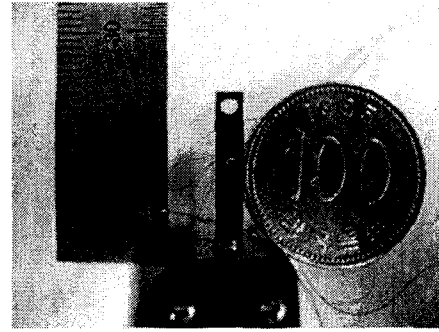


Fig. 6 Picture of Bimorph PZT Actuator

제작된 구동기의 끝단에서의 변위를 측정하기 위해 LDV(Laser Doppler Vibrometer, Polytech OFV 3001)를 사용하였고 설계된 제어기는 DSP(TMS 320C40 DSP Board)를 이용하여 구현되었다. DSP 를 통한 제어 입력은 14bit DA Converter, High Voltage Amplifier(±150V)를 이용하여 구동기에 인가하였다. Sampling Frequency 는 100kHz 로 이산 신호계이지만 요구되는 대역폭인 500 Hz 보다 충분히 크므로 연속 신호계로 가정하고 제어기를 구현하였다. Fig. 7 은 실험 장치의 구성도이다.

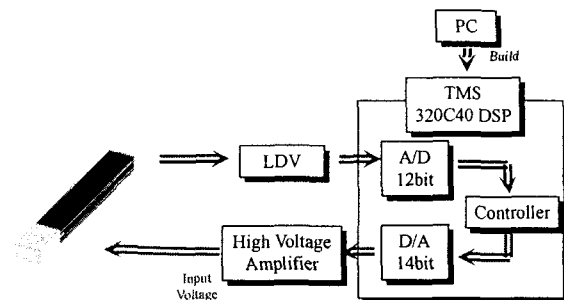


Fig. 7 Schematic Diagram of Experimental Setup

제어기의 설계에서 언급한 것처럼 구동기에는 10 μm, 500 Hz Sine 입력을 인가하고 이를 추종하는 실험을 하였다. 다음은 제어 실험 결과이다.

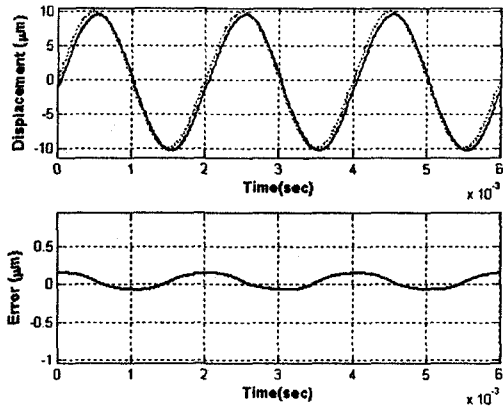


Fig. 8 Experimental Result

실험 결과에서 볼 수 있듯이 설계된 구동기와 제어기는 목표 입력($10\ \mu\text{m}$, $500\ \text{Hz}$ Sine)을 충실히 추종함을 확인 할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 유연 매체에 적용 가능한 구동기를 제안하였고 이를 Hamilton Principle 을 이용하여 구동기의 수학적 모델을 도출하였고 이렇게 도출된 수학적 모델은 유한요소해석과 실험을 통해 그 타당성을 입증하였다. 설계된 제어기를 제작하여 Lead-Lag Compensator 를 이용하여 제어기를 설계하고 제어를 수행하였다.

참고문헌

- (1) Yasutomo Aman, Nobuaki Onagi, Shozo Murata, Keisuke Uchida, 2004, "Effect of Stabilizer Reducing Effects of Axial Runout on a Flexible Optical Disk", JJAP, Vol. 43, No. 7B, pp. 4835-4838
- (2) Nobuaki Onagi, Yasutomo Aman, Shozo, Murata and Keisuke Uchida, 2004, "High-Density Recording on Air-Stabilized Flexible Optical Disk", JJAP, Vol. 43, No. 7B, pp. 4835-4838
- (3) Ton H. Akkermans, Sorin G. Stan, 2001, "Digital servo IC for optical disc drives", Control Engineering Practice, Vol 9, pp. 1245-1253
- (4) G. L. Anderson, 1978, "Natural Frequencies of Two Cantilever Joined by a Rigid Connector at their Free Ends", J Sound Vibration, Vol. 57, No. 3, pp.403~412
- (5) Won-Ik Cho, No-Cheol Park, Hyun-Seok, Young-Pil Park, 2002, "Swing-arm-type PZT dual Actuator with fast seeking for optical disk drive", Microsystems Technologies, Vol. 8, pp. 139~148