

Bimorph PZT 를 이용한 고밀도 광학헤드의 정밀위치 및 간극제어

Precision Position and Gap Control for High Density Optical Head Using Bimorph PZT

권영기* · 홍어진* · 박태욱** · 박노철** · 양현석*** · 박영필***

Young-Ki Kwon, Eo-Jin Hong, Tae-Wook Park, No-Chul Park, Hyun-Suk Yang and Young-Pil Park

Key Words : Dual Actuator, Bimorph PZT, NSOM(Near-field Scanning Optical Microscopy, Gap control

ABSTRACT

This paper proposed a dual actuator using bimorph PZT for information storage device based on prove array NSOM(Near-field Scanning Optical Microscopy). The gap between the media and the optical head should be maintained within the optical tolerance. Therefore, a new actuator having high sensitivity is required. Bimorph PZT, which has fast access time and high sensitivity characteristic, is suitable for this precise actuating system. This paper is focused on derivation of mathematical model of dual bimorph PZT actuator and control algorithm. Hamilton's principle was used for mathematical model. The model is verified by FEA(Finite Element Analysis), and compared with experimental results. Different control algorithms were used for two bimorph PZT actuating same direction and opposite direction. The gap between recording media and optical head was controlled within 20nm in experiment.

1. 서 론

정보를 기반으로 한 산업이 활성화되고 처리하고자 하는 정보의 양이 많아짐에 따라 기존의 HDD(Hard Disk Drive)나 ODD(Optical Disk Drive) 등의 저장장치로는 막대한 정보를 처리하는데 한계를 가지게 되었다. 기존의 저장장치들은 그 기록방식의 물리적 특성의 한계 때문에 고밀도 기록의 한계를 가지며 따라서 지금보다 몇 십 배의 저장용량을 지닌 신기술의 저장장치의 개발이 요구되고 있다.

NSOM(Near-field Scanning Optical Microscope)은 근접장 기록 방식(Near Field Recording)의 한 종류로서, 빛의 파장의 크기와 무관하게 정보의 양을 저장할 수 있기 때문에 기존의 ODD를 뛰어넘는 정보저장용량을 가질 것으로 기대되고 있다. 하지만 광학헤드와 저장하고자 하는 매체와의 간격이 수십 나노로 유지되어야 하기 때문에 광학헤드의 개발과 더불어 수십 나노의 간극을 유지할 수 있는 액츄에이터의 개발이 선행되어야 한다.

PZT 액츄에이터를 미동 액츄에이터(fine actuator), VCM 을 조동 액츄에이터(coarse actuator)로 사용하는 2 단 구동기(dual stage

actuator)의 연구는 HDD 분야에서 활발히 진행되어 왔으며⁽¹⁾, ODD 에 적용하려는 연구도 진행되고 있다⁽²⁾. 지금까지의 연구에서는 고용량화에 따른 고정밀도, 높은 서보대역폭을 달성하기 위해, 압전소자의 우수한 감도특성과 빠른 응답속도를 이용한 2 단 구동기의 트랙킹(tracking) 방향 제어에 관련된 것이 주를 이루며, 포커싱(focusing) 방향의 간극조절에 관한 기존의 연구는 아직 미진한 수준이다.

본 연구에서는 2 단 구동기의 미동 액츄에이터로 사용될 포커싱 방향의 간극제어 및 위치제어가 가능한 bimorph PZT 액츄에이터를 제안하였다. 다수의 탐침(probe)이 배열되어 있고 각각의 탐침은 일정한 간격을 유지하여야 하며, 2 개의 bimorph PZT 가 독립적으로 움직이면서 각 탐침의 간극을 조절하는 구조이다. VCM 액츄에이터와 PZT 액츄에이터는 서로의 역할이 다르고 제어하고자 하는 방향이 독립되어 있기 때문에 서로 영향을 미치지 않는다고 가정하고 PZT 액츄에이터를 따로 분리하여 실험을 하였다.

본 연구에서는 우선 제안된 이단구동 PZT 액츄에이터의 구조와 동적 거동을 해밀턴의 원리(Hamilton's principle)를 이용하여 PZT 액츄에이터의 모델을 도출하였다. DSA(Digital Signal Analyzer)를 이용하여 듀얼 액츄에이터의 동적거동을 분석한 후 지상-진상(lead-lag) 보상기를 DSP(Digital Signal Processor, DS1103 DSP board)를 이용하여 제어하였다.

* 연세대학교 대학원 기계공학과
E-mail : foryk76@empal.com
Tel : (02) 2123-4677, Fax : (02) 364-6769
.. 연세대학교 정보저장공학과
... 연세대학교 기계공학과

2. Dual actuator

본 논문에서 제안된 bimorph PZT 액추에이터는 Fig. 1 과 같이 2 개의 bimorph PZT 로 구성하였다. 2 개의 bimorph PZT 가 같이 움직이거나 독립적으로 구동하므로써 광학헤드와 디스크와의 간극을 제어하며, 광학렌즈는 2 개의 bimorph PZT 를 연결하는 보 위에 정렬되어 있는 것으로 가정하였다.

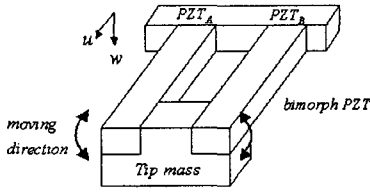


Fig. 1 Proposed dual actuator

3. 동적 모델링

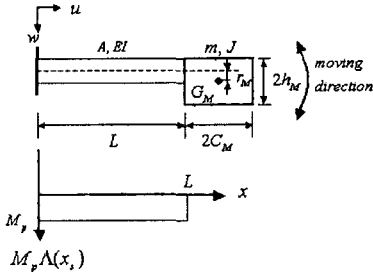


Fig. 2 Free body diagram of proposed PZT actuator

Fig. 2 는 PZT 액추에이터의 좌표계와 파라미터를 나타낸다. 좌측과 우측의 bimorph PZT 는 같은 방향으로 움직일 경우 하나의 bimorph PZT ($s=1$)로 가정하였다. 동적모델은 탄성계수 E , 2차 단면계수 I , 단위길이 당 무게 ρA 이고 길이가 L 의 베르누이-오일러 보(Bernoulli-Euler beam)로 가정하였으며, 끝단에 등가질량 m ($s=2$)이 연결되어 있다. 끝단의 집중질량 때문에 1 차 공진점과 2 차 공진점의 간격이 일반적인 보의 그것보다 멀어지기 때문에 치우침을 고려한 모델링이 요구된다⁽³⁾. 보의 길이 방향 변위를 $u(x,t)$, 폭 방향 변위를 $w(x,t)$ 라 하면, bimorph PZT 와 등가질량의 운동에너지와 위치에너지는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_1 = \frac{1}{2} \int_0^L \rho A [\dot{u}_1^2 + \dot{w}_1^2] dx_1, V_1 = \frac{1}{2} \int_0^L [EAu_1^2 + Ehw_1^2] dx_1, \\ T_2 = \frac{1}{2} m (\dot{u}_1^2(L,t) + \dot{w}_1^2(L,t)) + \frac{1}{2} J \dot{w}_1^2(L,t) \\ + m (C_M \dot{w}_1(L,t) \dot{w}_1(L,t) - r_M \dot{w}_1(L,t) \dot{u}_1(L,t)), \\ V_3 = 0$$

여기서, $J = (m/3)(C_M^2 + h_M^2) + m(C_M^2 + r_M^2)$ 이며, PZT 에 의한 비보존력(non-conservative work) W_{nc} 은 다음과 같다.

$$W_{nc} = \int_0^L M_p(t) \Lambda(x_1) w_1^* dx_1 \quad (2)$$

여기서, $M_p(t)$ 은 전압에 의한 bimorph PZT 에 발생된 굽힘모멘트이며, $\Lambda(x_s)$ 는 굽힘모멘트의 위치와 방향에 관한 함수이며 이는 헤비사이드 계단함수(Heaviside step function)을 이용하면 아래와 같이 표현된다.

$$\Lambda(x) = h(x-L) - h(x-0) \quad (3)$$

식 (4)에 표시된 해밀턴의 원리를 이용하면 지배방정식 (5)와 경계방정식 (6)을 구할 수 있다.

$$\delta \int_{t_1}^{t_2} \left[\sum_{s=1}^2 (T_s - V_s) + W_{nc} \right] dt = 0, \quad (4)$$

$$\rho A \dot{u}_1 - EAu_1' = 0, \quad \rho A \dot{w}_1 + Ehw_1'' = M_p(t) \Lambda'(x), \quad 0 \leq x \leq L \quad (5)$$

여기서, $x_1 = 0$ 일 때,

$$u_1 = w_1 = w_1' = 0,$$

$x_1 = L$ 일 때,

$$w_1 - w_1' = 0,$$

$$EAu_1' + m\ddot{u}_1 - mr_M \ddot{w}_1' = 0,$$

$$Ehw_1'' - m\ddot{w}_1 - mC_M \ddot{w}_1' = 0,$$

$$Ehw_1'' + mC_M \ddot{w}_1 - mr_M \ddot{u}_1 + (mc^2 + J) \ddot{w}_1' = 0 \quad (6)$$

길이 방향변위 $u_1(x,t)$ 와 폭 방향 변위 $w_1(x,t)$ 는 모드합성법을 이용하여 다음과 같이 표현된다.

$$u_1(x,t) = \sum_{i=1}^n U_i(x) q_i(t), \quad w_1(x,t) = \sum_{i=1}^n W_i(x) q_i(t) \quad (7)$$

여기서 $U_{i,j}$ 와 $W_{i,j}$ 는 길이방향 모드, 폭방향 모드의 형상 함수이다. 경계방정식과 지배방정식에서 모드형상 함수 $U_{i,s}$, $W_{i,s}$ 를 곱하고 적분하여 적조건을 만족하는 미분방정식(8)을 얻었다⁽⁴⁾.

$$J_i \ddot{q}_i(t) + K_i q_i(t) = M_p(t) \int_0^L \Lambda'(x) W_i(x) dx = M_p(t) W_i'(L),$$

$$\begin{aligned}
I_i &= \rho A \int_0^L U_i(x) U_i(x) dx + \rho A \int_0^L W_i(x) W_i(x) dx \\
&+ m W_i(L) W_i(L) + m C_M [W_i(L) W_i(L) + W_i(L) W_i'(L)] \\
&+ J W_i(L) W_i'(L) - m r_n U_i(L) W_i'(L), \\
K_i &= EA \int_0^L U_i'(x) U_i'(x) dx + EI \int_0^L W_i''(x) W_i''(x) dx - EA U_i(L) U_i'(L)
\end{aligned} \quad (8)$$

형상함수는 식 (9), (10)과 같은 균일 외팔보의 고유함수를 사용한다.

$$W_i(x) = [\cos(\sigma_i x) - \cosh(\sigma_i x) + \lambda_i \{\sin(\sigma_i x) - \sinh(\sigma_i x)\}] D_i, \quad (9)$$

$$U_i(x, t) = H_i \sin \alpha_i L \quad (10)$$

여기서,

$$\alpha_i^2 = \rho \lambda_i^2 / E, \quad \sigma_i^4 = \rho \omega_i^2 A / EI \quad (11)$$

λ_i 와 H_i 는 경계방정식 (6)으로부터 식 (12)와 같이 구해진다.

$$\begin{aligned}
\lambda_i &= \frac{m \omega_i^2 (\cos \sigma_i L - \cosh \sigma_i L) - m \alpha_i \sigma_i (\sin \sigma_i L + \sinh \sigma_i L) + 2EI \sigma_i^3 (\sin \sigma_i L - \sinh \sigma_i L)}{m \omega_i^2 (\sin \sigma_i L - \sinh \sigma_i L) + m \alpha_i \sigma_i (\cos \sigma_i L - \cosh \sigma_i L) - 2EI \sigma_i^3 (\cos \sigma_i L + \cosh \sigma_i L)} D_i \\
H_i &= \frac{-\omega_i^2 m r_n W_i(L)}{2EA \alpha_i \cos \alpha_i L - \omega_i^2 m \sin \alpha_i L}
\end{aligned} \quad (12)$$

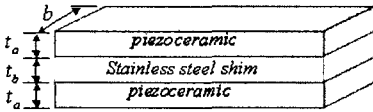


Fig. 3 Structure of bimorph PZT

액츄에이터로 사용된 bimorph PZT 의 구조는 Fig. 3 과 같다. Stainless steel shim 으로 강성을 확보하였으며 steel shim 주변에 piezoceramic 을 적층한 구조이다. Piezoceramic 의 두께와 탄성계수를 각각 t_a , E_a , stainless steel shim 의 두께와 탄성계수를 각각 t_b , E_b , piezoceramic 의 압전상수를 d_{31} , 폭을 h 라 할 때, 가해지는 전압과 발생하는 굽힘모멘트가 선형적인 관계를 가진다고 가정하면 각각 PZT 에 발생하는 굽힘모멘트는 식 (13)과 같다⁽⁵⁾.

$$M_p(t) = K_p u(t), \quad K_p = -d_{31} \left(\frac{t_b + 2t_a}{2} \right) \left(\frac{E_p E_s t_b}{E_s t_b + 2E_p t_a} \right) \quad (13)$$

각 모드에 대한 운동방정식은 식(14)와 같다.

$$\ddot{q}_i(t) + 2\zeta_i \omega_i \dot{q}_i(t) + \omega_i^2 q_i(t) = \frac{K_p u(t)}{I_i} [W_i'(L)] \quad (14)$$

상태공간식으로 표현하면 식(15)와 같다.

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}u(t), \quad y_{ip} = w_i(L, t) = \mathbf{C}\mathbf{X} \quad (15)$$

여기서, $\mathbf{X} = [q_i(t) \quad \dot{q}_i(t) \dots q_n(t) \quad \dot{q}_n(t)]^T$ 이며,

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & & & & \\ -\omega_1^2 & -2\zeta_1 \omega_1 & & & & \\ & & \ddots & & & \\ & & & 0 & 1 & \\ & & & & & -\omega_n^2 & -2\zeta_n \omega_n \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K_p}{I_i} [W_i'(L)] \\ \vdots \\ 0 \\ \frac{K_p}{I_n} [W_n'(L)] \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = [W_1(L) \quad 0 \quad \dots \quad W_n(L) \quad 0] \quad (16)$$

현재 NSOM 타입의 액츄에이터에 관련된 연구는 거의 전무한 상태이며, 이에 대한 요구 조건 역시 결정된 것이 없다. 따라서 본 논문에서는 DVD 1 배속의 포커싱 방향의 대역폭 1kHz 와 IBM Micro Drive 의 크기를 기준으로 액츄에이터를 제작하였다. bimorph PZT 의 물성치는 table 1 과 같다.

Table 1 Properties of bimorph PZT (PIEZO SYSTEM INC., T226-H4SS)

	Property	Piezo ceramic	Steel Shim
Bimorph PZT	Density (kg/m^3)	7700	7200
	Young's modulus (N/m^2)	6.1×10^{10}	21×10^{10}
	Thickness (mm)	0.27	0.12
	Width (mm)	1	
	Length (mm)	5	
	Stain Coefficient (m/V)	-320×10^{-12}	
Tip mass	Weight (g)	0.1	

Fig. 4 는 table 1 의 물성치와 모델링을 바탕으로 구한 주파수 응답 시뮬레이션과 실험을 통한 주파수응답결과를 비교한 것이다. 2 차 공진점 이후의 주파수응답이 근접하게 일치함을 볼 수 있다.

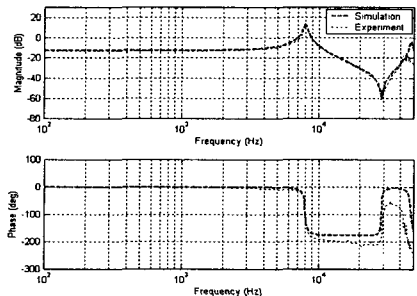


Fig. 4 Frequency responses of PZT actuator

Fig. 5 는 FEA 를 통한 모드해석 결과를 나타낸다.

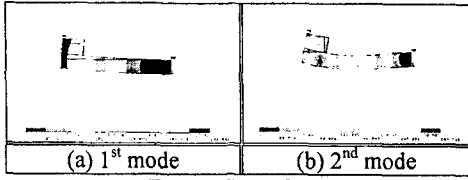


Fig. 5 FEA of PZT actuator

Table 2 는 이론적인 해석과, 실험 결과, 그리고 유한요소해석을 통해 구한 고유진동수를 나타낸 것이다. 1 차 공진점은 거의 정확하게 일치하며 2 차 공진점은 비교적 일치하였다.

Table 2 Comparison of natural frequencies

	1 st mode	2 nd mode
Theoretical analysis	7.879 kHz	44.988 kHz
Experiment result	7.925 kHz	47.830 kHz
FEA result	8.041 kHz	51.978 kHz

4. 제어기 설계

본 논문에서는 2 개의 PZT actuator 의 위상차가 0 도일 경우를 싱글모드(single mode)로 정의하였고 위상차가 90 도일 경우를 듀얼모드(dual mode)로 정의하였으며, 각각의 경우에 따라 제어기를 분리하여 설계하였다.

4.1 Single mode actuator

DVD 1 배속의 포커싱 방향의 대역폭은 약 1kHz 이고 본 연구에서 제안한 bimorph PZT 액츄에이터의 1 차 고유진동수는 8kHz 근방이기 때문에 1 차 공진점이 큰 영향을 미치지 않지만 그 이상의 대역폭을 확보하기 위해 1 차 공진점을 소거하였다. 2 차 공진점은 진상 보상기를 이용하여 크기를 감소시키고 위상을 확보해주기 위해 5kHz 부근에 지상 보상기를 추가하였다. 저역에서의 DC gain 을 높이기 위해 10Hz 부근에 새로운 1 차 시스템 극점을 추가하였다. 제어기의 전달함수는 식(17)와 같다. Fig. 6 은 제어기의 주파수 응답이다.

$$C(s) = \frac{1.22s^6 + 1.859 \times 10^6 s^5 + 7.257 \times 10^{11} s^4 + 1.664 \times 10^{16} s^3 + 1.917 \times 10^{21} s^2 + 2.651 \times 10^4 s + 8.703 \times 10^{28}}{s^6 + 453960s^5 + 7.627 \times 10^{10} s^4 + 5.625 \times 10^{15} s^3 + 1.549 \times 10^{20} s^2 + 1.004 \times 10^{23} s + 1.647 \times 10^{25}} \quad (17)$$

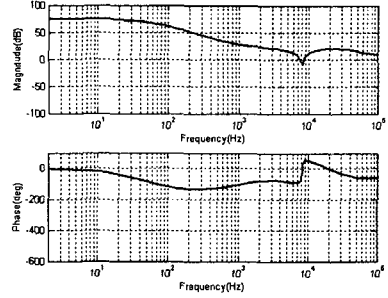


Fig. 6 Frequency response of controller

제어기를 적용한 후의 페루프 주파수 응답은 Fig. 7 과 같다.

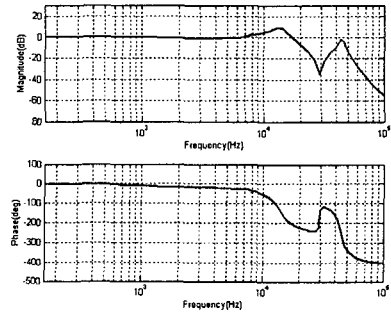


Fig. 7 Closed loop frequency response of actuator

4.2 Dual mode actuator

2 개의 액츄에이터가 같은 방향으로 움직일 경우에는 두 빔을 연결하는 빔의 영향을 받지 않으나 다른 방향으로 움직일 경우에는 서로 구속(coupling) 되어 서로의 움직임에 영향을 준다. 따라서 서로의 구속력이 고려된 제어기가 필요하며 아래의 Fig.8 은 구속력이 고려된 제어기의 구조이다.

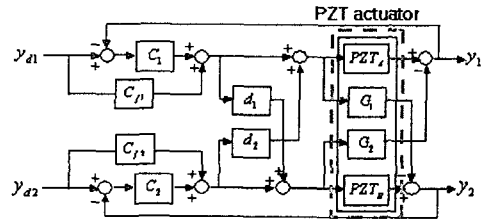


Fig. 8 Dual control loop

G_1, G_2 는 두 액츄에이터를 연결하는 보에 의해 영향을 나타낸 것이며 decouple gain d_1, d_2 는 이 영향을 고려하여 각각의 액츄에이터에 이에 해당하는 제어입력을 고려해준 것이다.

5. 실험 결과

Fig. 11 은 제안된 PZT 액추에이터의 사진이며, Fig. 12 는 실험장치의 개략도이다.

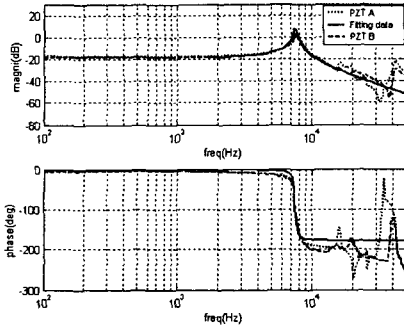


Fig. 9 Frequency response of each actuator

한쪽은 고정한 후 다른 한쪽만 가진시켰을 때의 주파수 응답은 Fig. 9 과 같다. 양쪽을 같은 방향으로 가진시켰을 경우보다 크기(magnitude)가 전체적으로 내려갔음을 볼 수 있다. 1 차 공진점 이전까지는 두 액추에이터의 주파수 응답이 같지만 1 차 이후로는 구조적인 차이나 구속의 정도에 의해 주파수 응답이 불규칙하게 측정되었다. 구속된 정도에 따라 주파수 응답이 다르기 때문에 1 차 공진점을 소거하지 않았다. 1 차 공진점 이전의 주파수를 제어하기 위해 간단한 2 차 시스템으로 모델링하여 지상-진상 보상기를 설계하였으며 모델 불확실성(model uncertainty)를 고려하여 앞먹임(feedforward) 보상기 C_{f1}, C_{f2} 를 적용하였다. d_1, d_2 는 구속되어 크기가 작아진 만큼의 게인 값을 적용하였다. 서로 구속된 조건을 고려하지 않았을 때의 각각의 전달함수는 식(18)과 같이 표현된다⁽⁶⁾.

$$G_{A,B} = \frac{PZT_{A,B}C_{1,2} + C_{f1,f2}}{1 + PZT_{A,B}C_{1,2}} \quad (18)$$

Fig. 10 은 페루프 주파수 응답곡선이다.

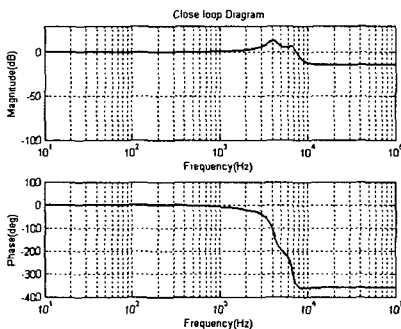


Fig. 10 Closed loop frequency response

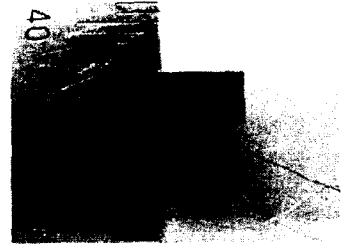


Fig. 11 Photography of bimorph PZT actuator

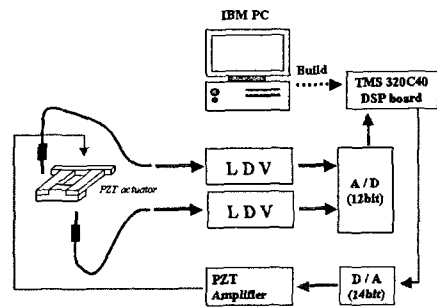


Fig. 12 Configuration of experimental setup

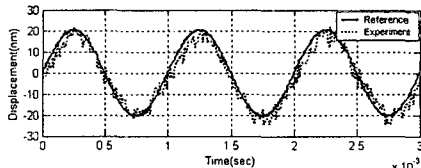
끝단의 이동변위의 측정에는 LDV(Laser Doppler Vibrometer, Polytech OFV3001)가 사용되었으며 같은 방향으로 움직일 경우 끝단 질량의 가운데를, 반대방향으로 움직일 경우 양 끝단을 측정하였다. 제어기의 구현은 DSP 를 통하여 이루어졌다. DSP 를 통한 제어입력은 14bit DA converter, high voltage amplifier ($\pm 150V$)를 거쳐 액추에이터에 전달된다. DSP 는 100kHz 샘플링 주파수로 데이터를 처리하였으며 이산 신호계이지만 요구 대역폭인 1kHz 보다 상당히 크므로 연속 신호계로 가정하였다.

DSP 의 AD converter 는 12bit 이며 분해능은 0.0049V 이다. LDV 는 2nm 까지 측정가능하며 분해능은 0.004V 이다. 따라서 2.45nm 단위로 DSP 가 인식하게 된다.

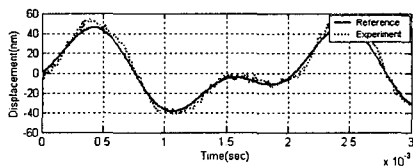
근접장 기록방식의 경우 광학헤드와 기록매체 사이의 간격은 광원의 파장보다 작아야 하며, 원활하게 정보를 읽고 쓰기 위해서는 오차 범위가 아직 정해지지 않았지만, 20nm 의 간극을 유지하여야 한다. 따라서 대역폭은 DVD 1 배속의 스펙에 맞추어 1kHz 를 목표로 실험을 하였고 입력신호의 크기는 20nm 로 하였다.

5.1 single mode actuator

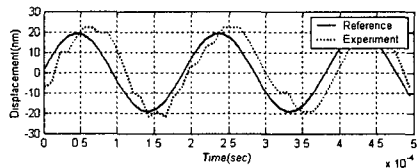
Fig. 13 은 액추에이터에 크기 20nm, 1kHz, 크기 30nm 500kHz 와 크기 20nm 1kHz 의 중첩, 크기 20nm 5.5kHz 의 정현파 입력을 주었을 때의 결과이다. 1kHz 까지는 입력값에 충실히 추종함을 볼 수 있으며 5.5kHz 에서는 위상 처짐 현상이 나타났다.



(a) Amplitude 20nm, Frequency 1kHz



(b) Amplitude 30nm, Frequency 500Hz + Amplitude 20nm, Frequency 1kHz



(c) Amplitude 20nm, Frequency 5.5kHz

Fig. 13 Experimental results of single mode

Fig. 14 는 20nm 의 스텝입력에 대한 응답을 나타낸다. 빠른 응답속도와 높은 트랙 추종능력을 가지는 것을 확인하였다.

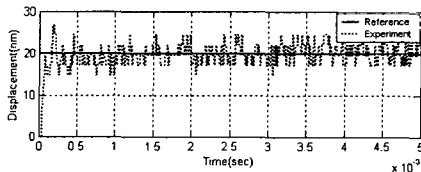
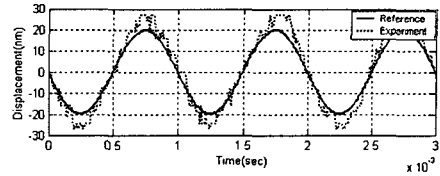


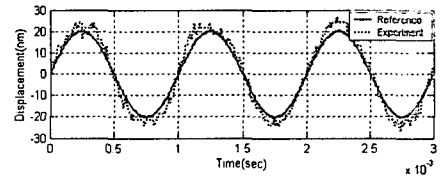
Fig. 14 Step response of single mode

5.2 Dual mode actuator

Fig. 15 는 각각의 액추에이터에 크기 20nm, 1kHz 인 위상차가 90 도인 정현파 입력을 주었을 때의 결과이다. 서로 구속되어 움직임에 제한을 받기 때문에 decouple gain 를 통해 보상하였다. Single mode 때보다 오차가 존재하지만 입력값에 충실히 추종하였다.



(a) PZT A



(b) PZT B

Fig. 15 Experimental results of dual mode

6. 결론

본 연구에서는 근접장 기록방식에서의 광학헤드와 기록매체의 간극제어에 사용될 bimorph PZT 액추에이터를 제안하였다. 해밀턴의 원리를 이용하여 액추에이터의 모델을 도출하였으며, 실험값과 FEA 와 비교하여 타당성을 입증하였다. 2개의 액추에이터가 같은 방향으로 움직일 때와 다른 방향으로 움직일 때 모두 지상-진상 보상기를 이용하여 제어를 수행하였으며 20nm 의 간극과 1kHz 의 대역폭을 확보하였다.

후기

본 연구는 한국과학재단(R11-1997-042-11000-0)지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Mori K, Munemoto T, Otsuki H, Yamaguchi Y, Akagi K, 1991, "A dual-stage magnetic disk drive actuator using a piezoelectric device for a high track density", IEEE Trans. Magnetics., Vol. 27, No. 6, pp. 5298-5300.
- (2) 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
- (3) Anderson, G.L. 1977, "Natural frequencies of a cantilever with an asymmetrically attached tip mass", AIAA JOURNAL, Vol. 16, No. 3, pp. 281-282
- (4) Anderson GL, 1978, "Natural frequency of two cantilever joined by a rigid connector at their free ends", J Sound Vibration, Vol. 57, No. 3, pp. 403-412
- (5) Bailey T, Hubbard Jr JE. 1985, "Distributed piezoelectric-polymer active vibration control of a cantilever beam", J Guidance, Control and Dynamics, Vol. 8, No. 5, pp. 605-611
- (6) Garduno-Ramirez, R., Lee, K.Y. 2000, "Feedforward compensated multiloop control of a power plant", Power Engineering Society Summer Meeting, IEEE, 2000. Vol. 1, pp. 206-211