

고밀도 광학헤드를 위한 Bimorph 압전 액추에이터의 동특성 해석 및 위치제어

Dynamic Characteristic Analysis and Position Control for High Density Optical Head Using Bimorph PZT

박태욱* · 박노철** · 양현석* · 박영필** · 권영기†

Tae-Wook Park, No-Cheol Park, Hyun-Seok Yang, Young-Pil Park
and Young-Ki Kwon

(2004년 7월 1일 접수 : 2004년 11월 29일 심사완료)

Key Words : Dual Actuator(2단 구동기), Bimorph PZT, NSOM(Near-field Scanning Optical Microscopy),
Gap Control(간극 제어)

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 20 nm 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 따라

서 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 액추에이터의 개발이 선행되어야 한다.

PZT 액추에이터를 미동 액추에이터(fine actuator), VCM(voice coil motor)을 조동 액추에이터(coarse actuator)로 사용하는 2단 구동기(dual stage actuator)

† 책임저자 : 정희원, 삼성전자 디지털프린팅 사업부

E-mail : foryk76@empal.com

Tel : (031) 277-8592, Fax : (031) 200-4649

* 연세대학교 정보저장기기 연구센터(CISD)

** 정희원, 연세대학교 정보저장기기 연구센터

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

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

이 연구에서는 우선 제안된 이단구동 PZT 액추에이터의 구조와 동적 거동을 해밀턴의 원리(Hamilton's principle)를 이용하여 PZT 액추에이터의 모델을 도출하였다. DSA(digital signal analyzer)를 이용하여 듀얼 액추에이터의 동적거동을 분석한 후 지상-진상(lead-lag) 보상기를 DSP(digital signal processor, DS1103 DSP board)를 이용하여 제어하였다.

2. Dual Actuator 모델링

이 논문에서 제안된 Bimorph PZT액추에이터는 Fig. 1과 같이 2개의 Bimorph PZT로 구성하였다. 2개의 Bimorph PZT가 같이 움직이거나 독립적으로 구동하므로써 광학헤드와 디스크와의 간극을 제어하

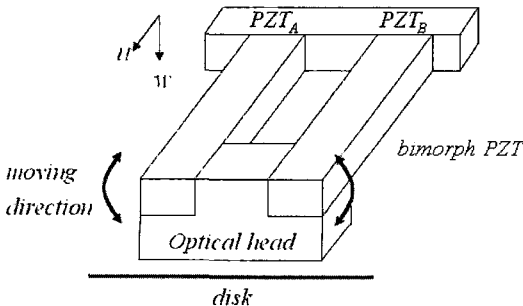


Fig. 1 Proposed dual actuator

며, 광학렌즈는 2개의 Bimorph PZT를 연결하는 보위에 정렬되어 있는 것으로 가정하였다.

Fig. 2는 PZT 액추에이터의 좌표계와 파라미터를 나타낸다.

좌측과 우측의 Bimorph PZT는 같은 방향으로 움직일 경우 하나의 Bimorph PZT($s=1$ 로 표기)로 가정하였다. 동적모델은 탄성계수 E , 2차 단면계수 I , 단위길이 당 무게 ρ_A 이고 길이가 L 의 베르누이-오일러 보(Bernoulli-Euler beam)로 가정하였으며, 끝단에 등가질량 m ($s=2$ 로 표기)이 연결되어 있다. 끝단의 집중질량 때문에 1차 공진점과 2차 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 PZT와 등가질량의 운동에너지와 위치에너지는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_1 = \frac{1}{2} \int_0^L \rho_A [\dot{u}_1^2 + \dot{w}_1^2] dx_1, V_1 = \frac{1}{2} \int_0^L [EAu_1^2 + EIw_1^2] dx_1,$$

$$T_2 = \frac{1}{2} m (\dot{u}_1^2(L, t) + \dot{w}_1^2(L, t)) + \frac{1}{2} J \dot{w}_1^2(L, t) + m(C_M \dot{w}_1(L, t) \dot{w}_1(L, t) - r_M \dot{w}_1(L, t) \dot{u}_1^2(L, t)) \quad (1)$$

$$V_2 = 0$$

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

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

여기서, $M_p(t)$ 은 전압에 의한 Bimorph PZT에 발생

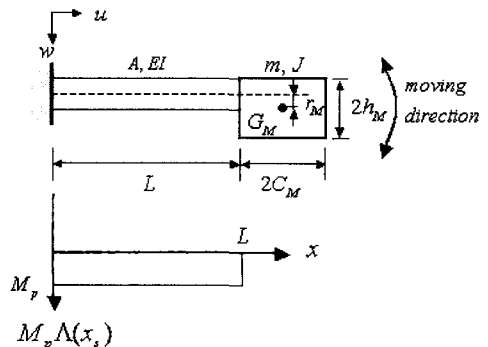


Fig. 2 Free body diagram of proposed PZT actuator

된 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 지배 방정식 (5)와 경계방정식 (6)을 구할 수 있다.

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

$$\begin{aligned} \rho A \ddot{u}_1 - EA u_1'' &= 0, \\ \rho A \ddot{w}_1 + EI w_1'''' &= M_p(t) \Lambda^*(x_1), \quad 0 \leq x_1 \leq L \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, $x_1 = 0$ 일 때,

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

$x_1 = L$ 일 때,

$$\begin{aligned} w_1 - w_1' &= 0, \\ EA u_1' + m \ddot{u}_1 - m r_M \ddot{w}_1' &= 0, \\ EI w_1'' - m \ddot{w}_1 - m C_M \ddot{w}_1' &= 0, \\ EI w_1'' + m C_M \ddot{w}_1 - m r_M \ddot{u}_1 + (m c^2 + J) \ddot{w}_1' &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

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 $U_{1,i}$ 와 $W_{1,i}$ 는 길이방향 모드, 폭방향 모드의 형상 함수이다. 경계방정식과 지배방정식에 모드 형상 함수 $U_{1,k}$, $W_{1,i}$ 를 곱하고 적분하여 직교조건을 만족하는 미분방정식 (8)을 얻었다.⁽¹⁾

$$\begin{aligned} I_i \ddot{q}_i(t) + K_i q_i(t) &= M_p(t) \int_0^L \Lambda^*(x) W_i(x) dx = M_p(t) W_i(L), \\ I_i &= \rho A \int_0^L U_i(x) U_i(x) dx + \rho A \int_0^L W_i(x) W_i(x) dx \\ &\quad + m W_i(L) W_i(L) + m C_M [W_i(L) W_i(L) + W_i(L) W_i'(L)] \\ &\quad + J W_i'(L) W_i'(L) - m r_M U_{1,i}(L) W_i'(L), \end{aligned} \quad (8)$$

$$K_i = EA \int_0^L U_i'(x) U_i'(x) dx + EI \int_0^L W_i''(x) W_i''(x) dx - EA U_i'(L) U_i'(L)$$

형상함수는 식 (9), (10)과 같은 균일 외팔보의 고

유함수를 사용한다.

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

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

여기서,

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

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

$$\lambda_i = \frac{m \omega_i (\cos \sigma_i L - \cosh \sigma_i L) - m c \omega_i \sigma_i (\sin \sigma_i L + \sinh \sigma_i L) + 2 E I \sigma_i (\sin \sigma_i L - \sinh \sigma_i L)}{m \omega_i (\sin \sigma_i L - \sinh \sigma_i L) + m c \omega_i \sigma_i (\cos \sigma_i L - \cosh \sigma_i L) - 2 E I \sigma_i (\cos \sigma_i L + \cosh \sigma_i L)} D_i$$

$$H_i = \frac{-\omega_i^2 m r_M W_i'(L)}{2 E A \alpha_i \cos \alpha_i L - \omega_i^2 m \sin \alpha_i L} \quad (12)$$

액추에이터로 사용된 Bimorph PZT의 구조는 Fig. 3과 같다. Stainless steel shim(스테인레스강)으로 강성을 확보하였으며 stainless steel shim 주변에 piezoceramic(압전세라믹)을 적층한 구조이다. Piezoceramic의 두께와 탄성계수를 각각 t_a , E_a , stainless steel shim의 두께와탄성계수를 각각 t_b , E_b , Piezoceramic의 압전상수를 d_{31} , 폭을 h 라 할 때, 가해지는 전압과 발생하는 굽힘모멘트가 선형적인 관계를 가진다고 가정하면 각각 PZT에 발생하는 굽힘모멘트는 식 (13)과 같다.⁽⁵⁾

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

$u(x, t)$ 는 횡방향변위이다. 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.

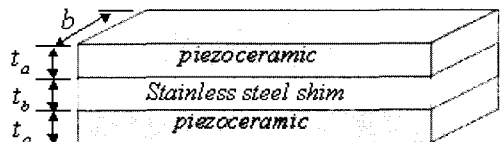


Fig. 3 Structure of Bimorph PZT

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

여기서, $\mathbf{X} = [q_1(t) \dot{q}_1(t) \dots q_n(t) \dot{q}_n(t)]^T$ 이며,

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

$$\mathbf{C} = [W_1(L) \ 0 \ \dots \ W_n(L) \ 0] \quad (16)$$

현재 NSOM 타입의 액추에이터에 관련된 연구는 거의 전무한 상태이며, 이에 대한 요구 조건 역시 결정된 것이 없다. 따라서 이 논문에서는 DVD 1배속의

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 (m/V)		
Tip mass	Weight (g)	0.1	

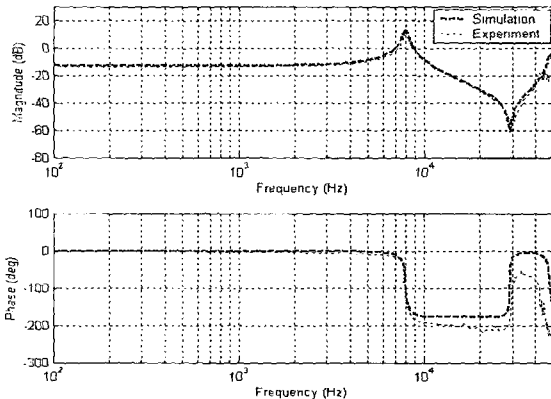


Fig. 4 Frequency reponses of PZT actuator

포커싱 방향의 대역폭 1 kHz와 IBM micro drive의 크기를 기준으로 액추에이터를 제작하였다. Bimorph PZT의 물성치는 Table 1과 같다.

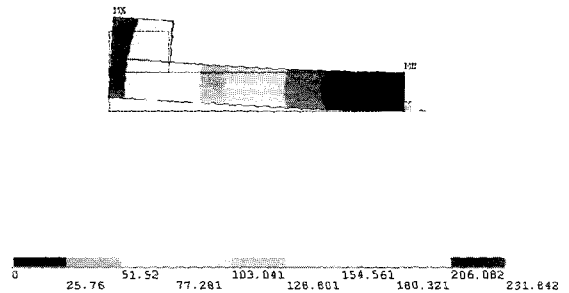
Fig. 4는 Table 1의 물성치와 모델링을 바탕으로 구한 주파수 응답 시뮬레이션과 실험을 통한 주파수 응답결과를 비교한 것이다. 40 kHz까지의 주파수응답이 근접하게 일치함을 볼 수 있다.

Fig. 5는 FEA를 통한 모드해석 결과를 나타낸다.

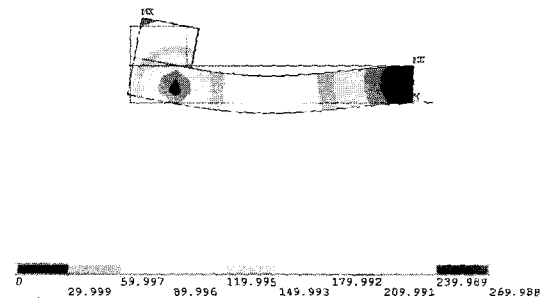
Table 2는 이론적인 해석과, 실험 결과, 그리고 유한요소해석을 통해 구한 고유진동수를 나타낸 것이다. 1차 공진점은 거의 정확하게 일치하며 2차 공진점은 최대 8.6% 오차로 일치하였다.

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



(a) 1st mode



(b) 2nd mode

Fig. 5 FEA of PZT actuator

3. 제어기 설계

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

3.1 Single Mode Actuator

DVD 1배속의 포커싱 방향의 대역폭은 약 1 kHz이고 본 연구에서 제안한 Bimorph PZT 액추에이터의 1차 고유진동수는 8 kHz 근방이기 때문에 1차 공진점이 큰 영향을 미치지 않지만 그 이상의 대역폭을 확보하기 위해 1차 공진점을 소거하였다. 2차 공진점은 진상 보상기를 이용하여 크기를 감소시키고 위상을

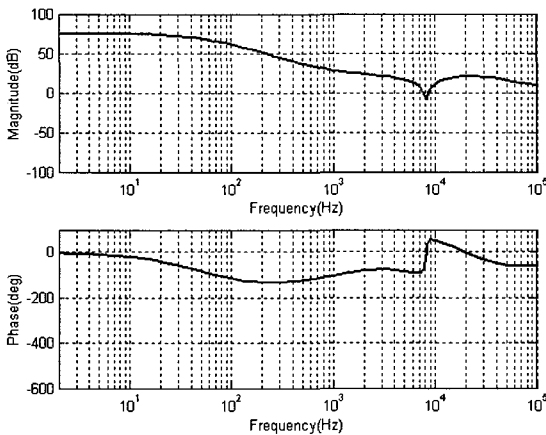


Fig. 6 Frequency response of controller

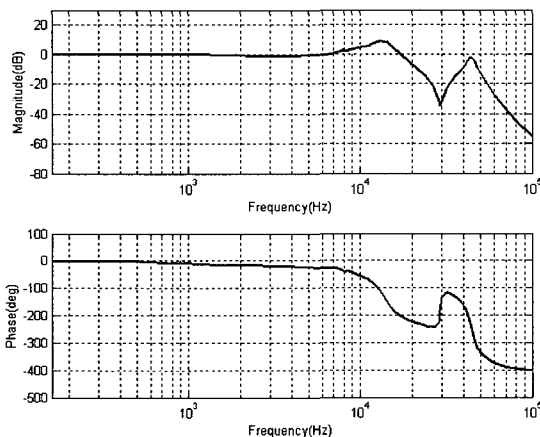


Fig. 7 Closed loop frequency response of actuator

확보해주기 위해 5 kHz 부근에 지상 보상기를 추가하였다. 저역에서의 DC gain을 높이기 위해 10 Hz 부근에 새로운 1차 시스템 극점을 추가하였다. 제어기의 전달함수는 식 (17)와 같다. Fig. 6은 제어기의 주파수 응답이다.

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

제어기를 적용한 후의 페루프 주파수 응답은 Fig. 7과 같다.

3.2 Dual Mode Actuator

2개의 액추에이터가 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. 8은 구속력이 고려된 제어기의 구조이다.

G_1, G_2 는 두 액추에이터를 연결하는 보에 의해

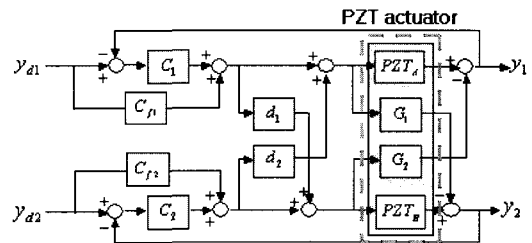


Fig. 8 Dual control loop

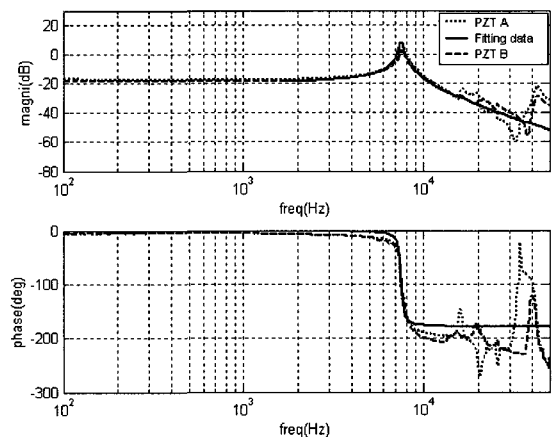


Fig. 9 Frequency response of each actuator

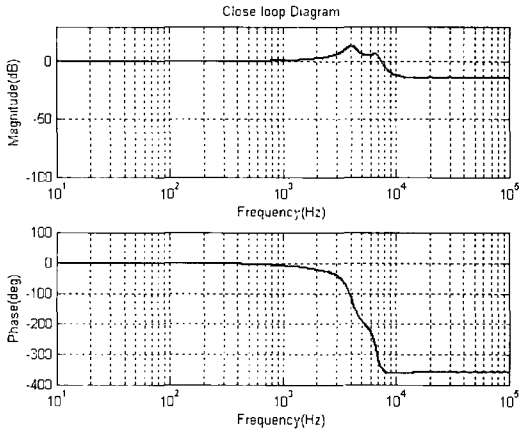


Fig. 10 Closed loop frequency response

영향을 나타낸 것이며 decouple gain d_1, d_2 는 이 영향을 고려하여 각각의 액추에이터에 이에 해당하는 제어입력을 고려해준 것이다.

한쪽은 고정된 후 다른 한쪽만 가진시켰을 때의 주파수 응답은 Fig. 9과 같다. 양쪽을 같은 방향으로 가진시켰을 경우보다 크기(magnitude)가 가 전체적으로 내려갔음을 볼 수 있다. 1차 공진점 이전까지는 두 액추에이터의 주파수 응답이 같지만 1차 이후로는 구조적인 차이나 구속의 정도로 인해 주파수 응답이 불규칙하게 측정되었다. 구속된 정도에 따라 주파수 응답이 다르기 때문에 1차 공진점을 소거하지 않았다. 1차 공진점 이전의 주파수를 제어하기 위해 간단한 2차 시스템으로 모델링하여 지상-진상 보상기를 설계하였으며 모델 불확실성(model uncertainty)를 고려하여 앞먹입(feedforward) 보상기 C_1, C_2 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.⁽¹⁶⁾

$$G_A = \frac{PZT_A C_1 + C_{f1}}{1 + PZT_A C_1}, G_B = \frac{PZT_B C_2 + C_{f2}}{1 + PZT_B C_2} \quad (18)$$

Fig. 10은 페루프 주파수응답곡선이다.

4. 실험 결과

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

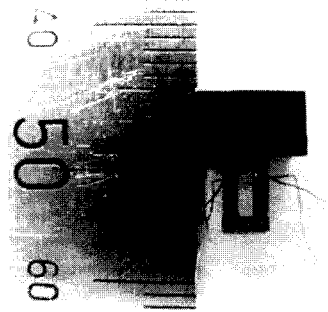


Fig. 11 Photography of Bimorph PZT actuator

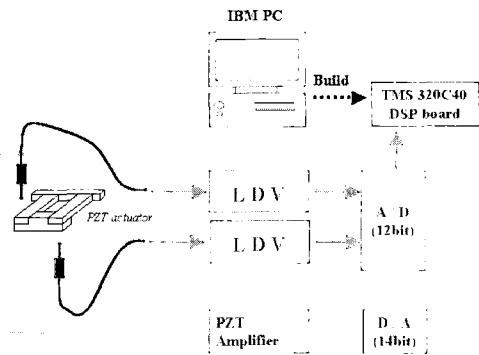
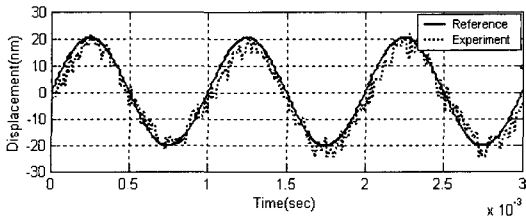


Fig. 12 Configuration of experimental setup

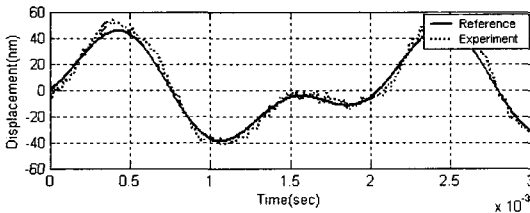
끝단의 이동변위의 측정에는 LDV(laser doppler vibrometer, polytech OFV3001)가 사용되었으며 같은 방향으로 움직일 경우 끝단 질량의 가운데대를, 반대방향으로 움직일 경우 양 끝단을 측정하였다. 제어기의 구현은 DSP를 통하여 이루어졌다. DSP를 통한 제어입력은 14 bit DA converter, high voltage amplifier(150 V)를 거쳐 액추에이터에 전달된다. DSP는 100 kHz 샘플링 주파수로 데이터를 처리하였으며 이산 신호계이지만 요구 대역폭인 1kHz보다 상당히 크므로 연속 신호계로 가정하였다.

DSP의 AD converter는 12 bit이며 분해능은 0.0049 V이다. LDV는 2 nm까지 측정가능하며 분해능은 0.004 V이다. 따라서 2.45 nm단위로 DSP가 인식하게 된다.

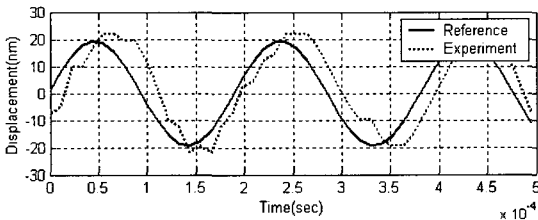
근접장 기록방식의 경우 광학헤드와 기록매체사이의 간격은 광원의 파장보다 작아야 하며, 원활하게 정보를 읽고 쓰기 위해서는 오차 범위가 아직 정해지지 않았지만, 20 nm의 간극을 유지하여야 한다. 따라서 대역폭은 DVD 1배속의 스펙에 맞추어 1 kHz를 목표로 실험을 하였고 입력신호의 크기는 20 nm로 하였다.



(a) Amplitude 20 nm, frequency 1 kHz



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



(c) Amplitude 20 nm, frequency 5.5 kHz
Fig. 13 Experimental results of single mode

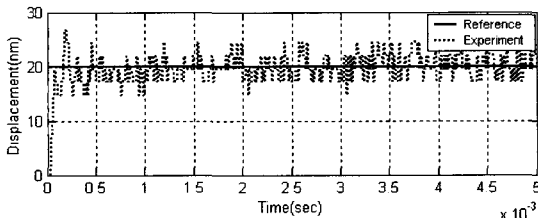
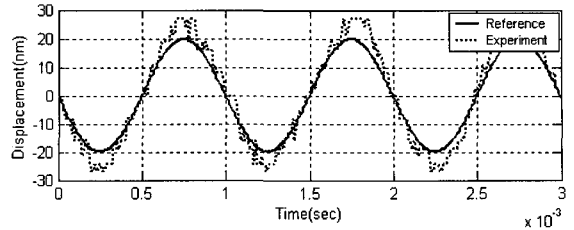


Fig. 14 Step response of single mode

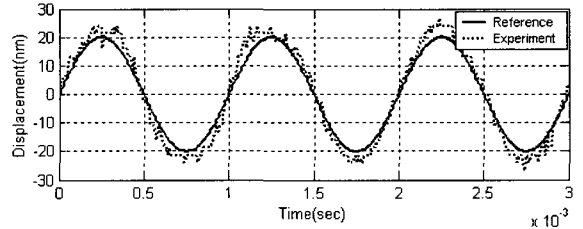
4.1 Single Mode Actuator

Fig. 13(a)는 액추에이터에 크기 20 nm, 1 kHz, (b)는 크기 30 nm 500 kHz와 크기 20 nm 1 kHz의 중첩, (c)는 크기 20 nm 5.5 kHz의 정현파 입력을 주었을 때의 결과이다. 1 kHz까지는 입력값에 충실히 추종함을 볼 수 있으며 5.5 kHz에서는 위상 처짐 현상이 나타났다.

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



(a) PZT A



(b) PZT B

Fig. 15 Experimental results of dual mode

4.2 Dual Mode Actuator

Fig. 15는 각각의 액추에이터에 크기 20 nm, 1 kHz 인 위상차가 180도인 정현파 입력을 주었을 때의 결과이다. 서로 구속되어 움직임에 제한을 받기 때문에 decouple gain를 통해 보상하였다. Single mode때보다 오차가 존재하지만 입력값에 충실히 추종하였다.

5. 결론

이 연구에서는 근접장 기록방식에서의 광학헤드와 기록매체의 간극제어에 사용될 Bimorph PZT 액추에이터를 제안하였다. 해밀턴의 원리를 이용하여 액추에이터의 모델을 도출하였으며, 실험값과 FEA와 비교하여 타당성을 입증하였다. 2개의 액추에이터가 같은 방향으로 움직일 때와 다른 방향으로 움직일 때 모두 지상-진상 보상을 이용하여 제어를 수행하였으며 20 nm 입력에 대한 제어를 수행하였으며 1 kHz의 대역폭을 확보하였다.

후 기

이 연구는 KOSEF(Korea Science and Engineering Foundation)의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (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) 이우철, 정동하, 박태욱, 박노철, 양현석, 2004, "PZT를 이용한 광정보저장기기용 액추에이터의 트랙 추적제어", 한국소음진동공학회논문집, 제 14 권, 5호, pp. 385~393.
- (3) Anderson, G. L. 1977, "Natural Frequencies of a Cantilever with an Asymmetrically Attached Tip Mass", AIAA JOURNAL., Vol. 16, No. 3, pp. 281~ 2820.
- (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.