

캔틸레버형 광 정보저장에서의 빠른 팁/매체 간극제어를 위한 팁/구동기의 동역학적 분석

Dynamic Analysis of Tip-actuators for Controlling Tip-media Gap in Cantilever Type Optical Data Storage

이성규*·송기봉**·김준호**·김은경**·박강호**

·남효진***·이선영***·김영식***

Sung-Q LEE *Ki-Bong SONG *Eun-Kyung KIM *Jun-Ho KIM *Kang-Ho PARK *

Hyo-Jin NAM *Caroline Sunyong LEE *Young-Sik KIM

Key Words : PZT actuator(압전구동기), Cantilever(캔틸레버), Gap control(간극제어), NSOM (근접장 현미경),
Data storage(정보저장)

ABSTRACT

Near-filed optical storage using cantilever aperture tip is a promising way for next generation optical data storage. To enhance the speed of reading and writing data, gap between tip and media should be controlled fast and precisely within near field region. In this paper, several PZT actuators are analyzed for constructing dual servo control algorithm: coarse actuators(stack PZT, bimorph PZT) for media surface inclination and fine actuator(film PZT) for media surface roughness. Dynamic analysis of stack PZT, bimorph PZT, and film PZT are performed through the frequency response. Based on the frequency response and mathematical model, fast analog controller is designed.

1. 서론

빛의 회절한계를 극복하는 근접장 광학을 이용한 정보저장방식은 CD 나 DVD 를 넘어선 차세대의 고밀도 광 정보 저장 장치의 유망한 기술로 제시되고 있다[1-3]. 캔틸레버의 끝에 파장보다 작은 구멍이 뚫린 광 탐침을 통하여 정보를 기록/재생하는 방법은 광섬유를 이용하는 방법보다 광 헤드의 집적화, 안정성, 기록재생속도의 증가 및 제어 속도증가의 용이성으로 말미암아 상용화의 가능성이 더 큰 방법이다. 구멍 있는 캔틸레버형 광 탐침을 이용하여 정보저장을 함에 있어서 고속의 기록/재생을 위해서는 광 탐침과 매체간의 간극을 근접장 광학이 적용될 수 있는 거리인 수십 nm 를 유지하도록 정밀하고 빠르게 제어 해야 한다. 빠른 제어를 위해서는 구동기와 센서모두 빠른 응답을 가져야 한다.

현재 일반 원자현미경에서 탐침과 시료간의 간극

을 조절할 수 있는 구동기로 사용되고 있는 것들은 튜브형 압전구동기(PZT), 스택형 압전구동기, 그리고 바이모프형 압전구동기 등이 있다. 현재까지 가장 많이 사용하고 있는 것은 튜브형 압전구동기로 하나의 구동기로 XYZ 3 축 운동이 가능하다. 튜브형 압전구동기의 Z 방향으로의 간극제어 속도를 높이기 위해서 주파수응답을 바탕으로 한 제어기 설계에 대한 연구가 되었다[4]. 하지만 이 연구에서 보듯이 튜브형 압전구동기의 고차모드에 의해서 그 속도를 수십 kHz 이상 크게 하기는 어렵다. 본 논문에서는 튜브형 압전구동기와 비슷한 성능 및 특성을 가진 스택형 압전구동기, 좀더 행정거리가 긴 바이모프형 압전구동기에 대한 주파수영역에서의 특성을 알아보았다. 이들의 제어 성능 또한 튜브형과 비슷한 성능을 갖는다. 좀더 빠른 간극제어를 위해서는 구동기의 고차모드가 높은 주파수 영역에서 일어나는 구동기이다. 이를 만족하는 것으로 캔틸레버에 박막 압전구동기를 공정으로 제작한 구동기가 있다[5]. 동역학적인 분석을 수행을 통해서 보면, 박막형 압전구동기의 경우 수십 kHz 이상에서 고차모드가 가진 되므로 팁/매체간의 간극제어가 더 빠르게 됨을 알 수 있다. 센서의 경우 팁 끝 단에서의 위치정보를 광 센서를 사용하여 감지하는 경우와, 캔틸레버의 지지부에 Piezo resistor 를 이용해서 위치정보를

* 한국전자통신연구원(ETRI)
E-mail : hermann@etri.re.kr
Tel : (042) 860-1142, Fax : (042) 860-6836
** 한국전자통신연구원(ETRI)
*** LG 전자기술원

감지하는 것으로 나눌 수 있는데, 후자의 경우 위치정보에서의 위상차가 발생하고 민감도면에서도 약점이 있으나 직접화에 유리한 특징을 가진다. 본 논문에서는 스택형, 바이모프형, 박막 압전구동기의 주파수 응답을 통하여 동역학적 특징을 살펴보았다. 아울러 박막 압전구동기의 경우 빠른 제어를 위해서는 구동기의 고차모드를 수학적으로 모델링하여 시스템에 대한 분석을 한 후 실제 실험결과를 기준으로 모델을 수정하고 이를 바탕으로 제어를 설계하였다.

2. 시스템 구성

2.1 실험 장치 및 세부구조

그림 1은 캔틸레버형 광 정보저장장치의 개략도이다. 캔틸레버의 끝단에 약 100nm 크기의 구멍이 있는 팁이 있고 아래에는 미디어를 XY 방향으로 스캔 할 수 있는 스캐너가 있고 팁 끝을 Z 방향으로 구동하는 구동기가 있다. 캔틸레버형 근접장 광 정보저장장치의 원리는 팁 위에서 레이저를 주사할 때 100nm 크기의 구멍을 통해서 생기는 소산파 광 탐침을 사용하여 정보를 미디어에 기록하거나 재생한다. 이때 근접장을 통해서 기록/재생을 하기 위해서는 팁 끝을 미디어에서 레이저 파장보다 아주 작은 범위인 약 10nm 정도로 정밀하게 유지할 해야 한다.

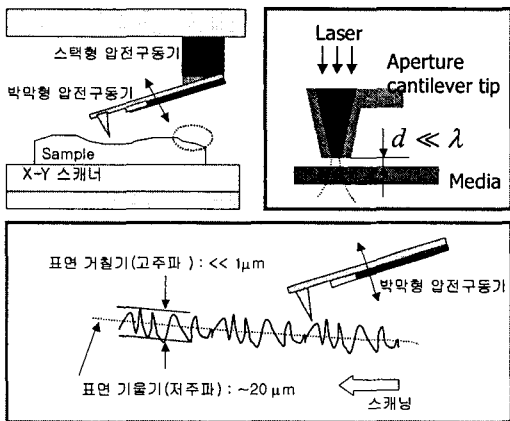


그림 1. 근접장 광 탐침을 이용한 정보저장장치

일반적으로 미디어 표면은 표면의 기울기에 해당하는 성분과 표면의 거칠기에 해당하는 성분이 함께 존재한다(그림 1). 팁과 미디어의 간극을 일정하게 제어하기 위해서는 저주파 성분의 표면의

기울어진 부분도 추종해야 하지만 고주파 성분의 표면 거칠기도 함께 추종해야 한다. 데이터전송속도 커짐에 따라 스캔 속도가 빨라지는데, 스캔 속도가 빨라지면 표면의 거칠기에 해당하는 주파수는 높아지게 된다. 이러한 고주파의 외란을 잘 극복하고 일정한 간극을 유지하기 위해서는 팁 끝을 구동하는 구동기와 팁 끝의 위치를 측정하는 센서의 응답속도가 매우 빨라야 한다.

2.2 이중 서보 구조의 간극제어구성도

앞 절에서 언급한 바와 같이 미디어의 표면은 저주파 영역의 기울어진 성분과 고주파 영역의 표면 거칠기로 나누어 진다. 주로 저주파에 해당하는 기울어진 정도는 수십 um 수준이고 표면의 거칠기는 1um 이내이다. 이러한 두 가지 성분을 모두 다 추종하는 구동기가 있다면 정보저장장치에서 빠른 스캔이 가능해지고 빠른 기록/재생속도를 얻을 수 있다. 하지만 현재 사용되고 있는 구동기의 대표적인 것으로는 튜브 압전구동기, (튜브스캐너), 스택형 압전구동기가 주를 이루는데, 이들의 고속제어를 위한 노력이 있었지만 구조적으로 캔틸레버를 구동기에 부착하므로 발생하는 구조 진동으로 말미암아 스캔 속도에 한계가 존재하게 된다. 이는 다음장의 주파수 응답 실험결과에서도 알 수 있다. 표면의 기울어진 성분은 주파수 영역으로 보면 저주파이지만 그 양(행정거리)은 커서 그림 2와 같이 이중 서보 구조를 통해서 빠른 스캔을 하고자 한다.

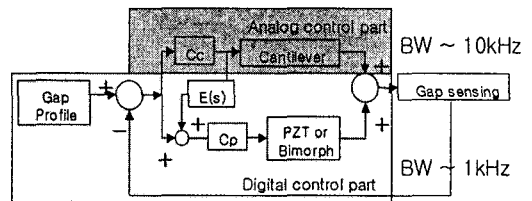


그림 2. 빠른 스캔을 위한 이중 서보 제어 구성도

박막 압전구동기는 고유진동수가 수십 kHz~수백 kHz 수준이므로 응답속도를 수 usec 수준으로 빨리 할 수 있다. 하지만 이렇게 하기 위해선 디지털 제어로는 불가능하므로 아날로그 제어를 구성해야 한다. 한편 표면의 저주파 영역은 응답속도가 느려도 되므로 간편한 디지털제어를 구성하여 혼합된 형태의 제어를 하도록 한다. 오차 값 $(E(s))$ 은 피드백하면 캔틸레버의 위치가 양쪽 끝단으로 가는 것을 방지할 수 있다.

3. 구동기의 주파수 응답

이장에서는 저주파 영역의 미디어 표면의 기울어짐을 추종하는데 사용되는 스택형 압전구동기 혹은 바이모프 압전 구동기와 고주파 영역을 추종하는 캔틸레버 위에 공정으로 만들어진 박막형 압전구동기에 대한 각각의 주파수 응답을 살펴보고 그 성능을 분석한다. 이러한 주파수 응답실험은 5장에서 다룰 제어기 설계에서 필요하게 된다. 실험에 사용한 스택형, 바이모프형 압전소자는 PI사 제품이며 박막형 압전소자는 LG 기술원에서 제작하였다.

3.1 스택형 압전구동기의 주파수 응답

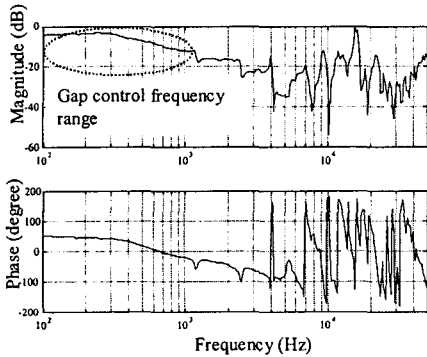


그림 3. 스택형 압전구동기의 주파수 응답(실험)

스택형 압전소자는 1kHz 부근부터 고차모드가 가진 된다. 10kHz 대에서는 상당히 많은 고차모드가 가진되어 제어를 잘 설계한다 해도 불안정한 양상을 보일 것이다. 따라서 이를 통해 스택형 압전소자는 샘플을 스캔함에 있어서 간극방향(Z)으로의 제어의 한계가 수 kHz 대가 된다. 실제 응용에 있어서도 스택형 압전소자는 유연 힌지구조와 더불어 사용하므로 유연 힌지 구조의 고유진동수 이상으로 제어한다는 것은 어렵다. 따라서 스택형 압전구동기는 저주파 표면의 기울어짐을 추종, 극복하는 제어에 용이할 것이다.

3.2 바이모프 압전구동기의 주파수 응답

바이모프형 압전소자는 300Hz 부근부터 고차모드가 가진 된다. 1kHz 대에서는 상당히 많은 고차모드가 가진 되어 더 이상의 빠른 응답을 기대하기 어렵다. 간극방향(Z)으로의 제어의 한계가 수백

Hz 대가 될 것이다. 바이모프형 압전소자는 비록 고유진동수가 낮아서 제어 응답속도에서는 뒤떨어지지만 행정거리가 큰 것은 1mm 정도가 되므로 대면적 스캔을 할 때 표면의 기울어짐이 크다 하더라도 문제가 없게 된다.

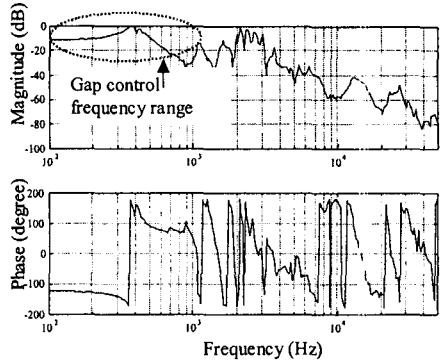


그림 4. 바이모프 압전구동기의 주파수 응답(실험)

3.3 박막형 압전구동기의 주파수 응답

박막형 압전구동기는 캔틸레버의 한면에 압전 재료를 반도체 공정으로 만든 것으로 그림 5와 같다. 압전 재료를 이용하여 구동기와 압전저항 센서를 장착한 캔틸레버이다. 본 논문이 지향하는 바 캔틸레버 끝에 구멍이 있는 팁은 아니지만 기본적으로 간극제어를 실험함에 있어서는 동일하다고 볼 수 있으므로 그림 5의 팁을 이용하여 캔틸레버 동역학을 분석하고 제어기를 설계하였다.

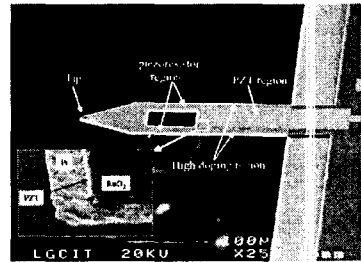


그림 5. 박막형 압전구동기

그림 6 Bode 선도를 나타낸다. 그림에서 주파수를 더 높여 가면서 응답을 살펴봐야 하나 본 실험실에서 사용한 Lock'in amp의 성능의 한계로 말미암아 200kHz 까지 측정을 하였다. 저주파 영역부터 고주파 영역까지 다른 모드가 없고 첫번째 모드가 약 75kHz 근처에서 나타나며 바로 이어서 약 130kHz에서 Zero가 있어서 180도 떨어진 위상이 다시 회복됨을 볼 수 있다. 아울러 천천히 위상이 떨어지는 것은 Lock'in Amp 자체에 있는 회로에서

나타나는 1 차 모드로 추정된다. 그림에서 나타나진 않았지만 캔틸레버는 단순 보(beam)로 여겨지므로 2 차 3 차 등 고차 모드가 존재할 것이 예상된다.

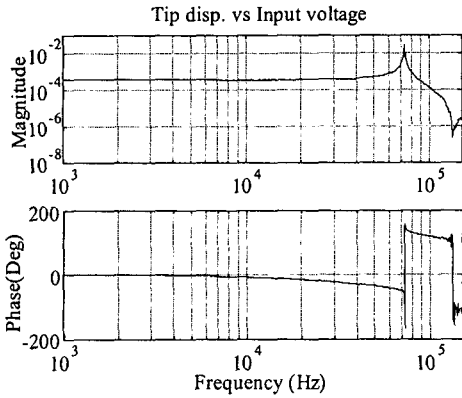


그림 6. 박막형 압전구동기의 주파수 응답(실험)

4. 박막형 압전구동기 모델링

디디어를 스캔할 때 미디어 표면의 기울어짐이나 표면 거칠기는 팁에 미치는 외란이 되며 외란을 빨리 극복하고 간극을 10nm 수준으로 정밀하고 빠르게 제어하려면 압전구동기가 빠른 응답을 갖도록 설계하여야 한다. 이를 위해서는 박막형 압전구동기의 동역학적인 특성을 알아야 하므로 3 장에서 주파수 응답곡선을 얻었지만 Lock'in amp 의 측정한계로 인해 더 높은 주파수 범위에서의 동역학적 특성을 파악할 수 없었다. 이에 수학적 모델링을 통해서 캔틸레버의 고차 동역학적인 특성을 살펴보고 이에 적합한 제어를 설계하고자 한다. 수학적 모델을 알면 모의실험을 통해서 제어 성능향상을 시도하고 예측할 수 있으므로 유용하다.

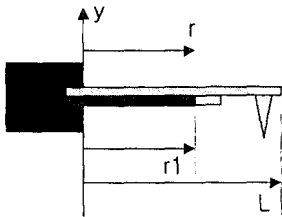


그림 7. 박막형 압전구동기의 수학적 모델링

단순 보(beam)에 대한 지배방정식은 다음과 같다[6].

$$\frac{\partial^2}{\partial^2 x} [EI \frac{\partial^2 y(r,t)}{\partial^2 x}] + c \frac{\partial y(r,t)}{\partial t} + \rho A \frac{\partial^2 y(r,t)}{\partial^2 t} = f(x,t)$$

이 지배방정식을 풀기위해서 해가 존재할 때 시간과 공간으로 분리하여 그 해를 다음과 같이 쓴다.

$$y(r,t) = \sum_{i=1}^N \phi_i(r) q_i(t)$$

여기서 $\phi_i(r)$ 는 Mode shape 이며, 앞의 지배방정식은 경계조건을 적용하면 시간에 따른 변수 $q_i(t)$ 는 다음의 지배 방정식을 만족한다.

$$\ddot{q}_i + C\omega_i^2 \dot{q}_i + \omega_i^2 q_i = M(\phi_i'(r1) - \phi_i'(0))$$

박막형 압전구동기에 들어가는 전압 $v_a(t)$ 에 대한 보(beam)의 휨(deflection)량 $y(r,t)$ 에 대한 라플라스 변환을 하여 구한 전달함수는 다음의 식이 된다.

$$\frac{Y(r,s)}{V_a(s)} = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{C_a \phi_i(r) \phi_i'(r1)}{\rho A L^3 (s^2 + \omega_i^2)}$$

여기서 상수 $C_a = \frac{1}{2} E_a d_{31} w(t_a + t_b)$ 로 압전소자의 특성치로 구성된 상수이고, 모드

$$\phi_i(r) = L(\cosh \lambda_i r - \cos \lambda_i r - k_i(\sinh \lambda_i r - \sin \lambda_i r))$$

$$k_i = \frac{\cosh \lambda_i L + \cos \lambda_i L}{\sinh \lambda_i L + \sin \lambda_i L}$$

이다. 여기서 λ_i 는 다음의 식,

$$1 + \cosh \lambda_i L \cos \lambda_i L = 0$$

를 풀었을 때 나오는 해로 얻을 수 있으며 각

모드에서의 진동수는 $\omega_i = \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \lambda_i^2$ 이다.

이상에서 유도한 식에서 2 차 모드까지 고려하여 전개하고, 실험결과와 비교하여 파라미터를 조정하였다.

5. 아날로그 제어기 설계

박막형 압전구동기에 대한 제어를 위해 캔틸레버의 고유진동수가 수십 kHz~수백 kHz 수준이므로 응답속도를 수 usec 수준으로 빨리 할 수 있도록 아날로그 제어기를 구성하였다. 앞장에서 구한 모델을 바탕으로 2 차 모드까지 고려하여 제어를 설계하였고 설계방법은 MATLAB 에서 지원하는 보상기(Compensator)설계 Tool 을 이용하여 적절한 위치에 극점과 제로점을 배치하였다. 그림 8 은 2 차 모드까지 고려한 캔틸레버에 대한 근 궤적과 Bode 선도이다. 그림과 같이 극점 4 개 제로점 2 개로 구성되어 있고 감쇄계수가 아주 낮다. 이에 대해서 그림 9 와 같이 극점과 제로점을 배치하여 Close loop bandwidth 를 100kHz 이상

으로 되도록 구성하였다. 그림 10 과 11 은 각각 제어기 없는 계단과 입력에 대한 응답과 제어기를 설계한 후에 본 계단과 입력에 대한 응답 곡선이다. 표면 거칠기에 대한 외란이 계단과 입력으로 가정한다면 빠른 응답을 통해 외란을 극복하고 팁과 미디어 표면을 잘 제어할 것으로 기대된다.

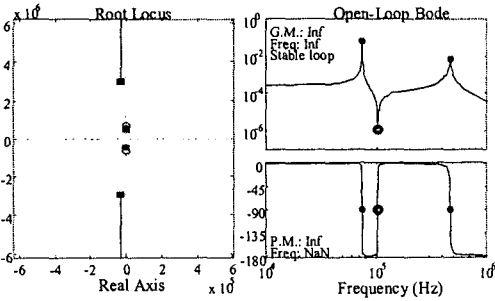


그림 8. 박막형 압전구동기 근궤적과 Bode 선도

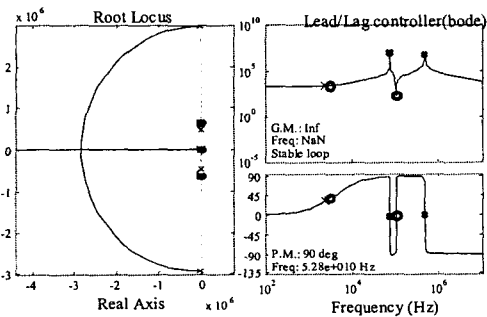


그림 9. 극점과 제로점을 통한 제어기 설계

6. 결론

캔틸레버형 광 정보저장기에 사용되는 간극 제어용 구동기를 살펴보았다. 스택형 압전구동기와 바이모프 압전구동기는 그 변위량은 상대적으로 많으나 구동기 자체 혹은 구조물에서의 진동으로 말미암아 안정적으로 제어할 수 있는 영역이 수 kHz 로 표면의 기울어짐을 추종하는데 사용될 수 있으며 캔틸레버에 직접 만들어진 박막형 압전구동기는 캔틸레버의 구조적인 진동 범위 내에서 수십 kHz 이상의 제어범위를 가짐을 알 수 있었고 이를 수학적으로 해석하여 제어기를 설계함으로써 그 제어범위를 크게 하여 빠르게 스캔을 할 때 표면 거칠기와 같은 고주파 성분을 잘 극복하고 팁과 미디어 사이의 간극을 정밀하고 빠르게 제어할 수 있을 것으로 예상된다.

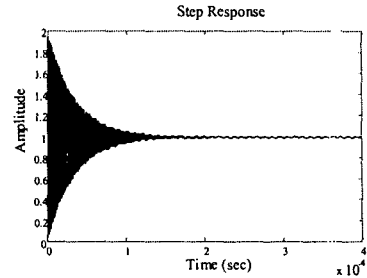


그림 10. 제어기 설계전의 박막형 압전구동기의 계단과 응답(모의실험)

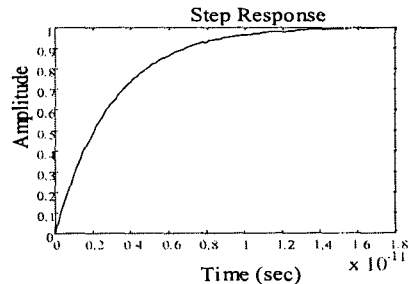


그림 11. 제어기 설계후의 박막형 압전구동기의 계단과 응답(모의실험)

후기

이 연구는 정보통신부의 지원으로 이루어졌습니다.

참고문헌

- (1) E. Betzig, J. K. Trautman, R. Wolfe, E. M. Gyorgy, P. L. Finn, M.H. Kryder and C.H. Cahang, 1992, "Near-field magneto-optic and high density data storage", Appl. Phys. Lett. vol. 61, pp.142-144
- (2) B. D. Terris, H. J. Mamin, and D. Rugar, 1996, "Near-field optical data storage", Appl. Phys. Lett. vol.68, pp.141-143
- (3) Jeongyong Kim, Ki bong Song, Kang-ho Park, Hyo won Lee, and Eunkyung Kim, 2002, "Simple near-field optical recording using bent cantilever proves", ETRI Journal, vol. 24, no. 3, pp. 205-210
- (4) Osamh M. El Rifai, and Kamal Youcef-Toumi, 2002, "Dyanmics of Atomic force microscope: Experiments and Simulations", IEEE Int. Conf. On Control App., pp.1126-1131.
- (5) Young-Sik Kim, Hyo-jin Nam, Seong-Moon Cho, Jae-Wan Hong, Dong-Chun Kim, Jong U. Bu, 2003, "PZT cantilever array integrated with piezoresistor sensor for high speed parallel operation of AFM", Sensor and Actuator A, Vol. 103, pp. 122-129
- (6) Tadao Takigami, Kazuhiko Shima, and Yoshikazu Hayakawa, 1997, "Application of self-sensing actuator to control of a cantilever beam", ACC, pp.1867-1872