

개구형 근접장 헤드장치의 간극제어를 위한 이중 서보 제어[#]

Dual Servo Control for Aperture Type Near Field Storage Head

이 성 규[†] · 김 은 경^{*} · 박 강 호^{*}

Sung-Q Lee, Eun-Kyoung Kim and Kang-Ho Park

(2005년 12월 6일 접수 ; 2006년 3월 22일 심사완료)

Key Words : Dual Servo(이중 서보), Aperture(개구), Active Gap Control(간극 능동 제어), Near-field(근접장)

ABSTRACT

This paper presents an active control of the aperture type near-field storage head. In order to achieve a fast and accurate control, a dual servo control algorithm is applied. Based on the big difference in time constants of two actuators, they are used independently. With the combination of fine and coarse actuator, the disk is rotated up to 10 rpm speed until the gap is controlled within 100 nm. From the experimental results, the feasibility and the performance of active dual servo gap control is proved.

기 호 설 명

- C_c : Coarse actuator controller
- C_f : Fine actuator controller
- $E(s)$: Transfer function of fine actuator control input
- BW : Bandwidth

1. 서 론

빛의 회절현상을 넘어서 광으로 정보를 기록하는 근접장 광 정보저장 장치는 CD나 DVD 이후의 차세대 고밀도 광 정보저장 장치의 유망한 기술로 제시되고 있다.^(1,2) 파장 보다 작은 개구를 이용하여 정보를 저장하는 방식은 광섬유를 이용하는 방법보다

도 광 헤드 장치의 집적화, 안정성, 효율적 측면에서의 우수하며 제어 속도증가의 용이성으로 말미암아 많은 연구가 진행 되고 있다.

파장보다 작은 개구와 미디어(시편) 사이의 간극을 근접장이 형성되는 거리인 100 nm 이하로 정밀하게 제어하는 방식으로는 슬라이더 방식의 수동 간극제어 방법과 구동기를 사용하여 간극을 측정하면서 능동적으로 간극을 제어하는 방법이 있으며 현재까지는 슬라이더 방식의 수동 제어방법이 널리 이용되고 있다. 슬라이더 방식은 공압을 적절하게 일으키는 구조의 슬라이더나 일정한 높이를 유지하기 위한 서스펜션의 설계기술로도 하나의 어려운 기술이며 개구를 슬라이더에 정밀하게 조립하는 것 또한 쉽지 않다.^(3,4)

본 논문에서는 개구를 슬라이더에 장착하는 방식이 아닌, 개구를 외팔보에 단체로 제작하고 이 외팔보와 개구를 외부 구동기를 사용하여 능동적으로 간극이 제어 되도록 하였다. 탐침형 정보저장 장치를 위해서 Kimio⁽⁵⁾ 등은 탐침을 CD트래킹/포커싱 구동기에 장착하여 트래킹을 하면서 탐침과 미디어 사이의 힘을 이용하여 간극을 능동적으로 제어하는 방식의 가능성을 보였다. 이때 제어속도의 한계로 인해 디스크 회전속도는 0.001~1.1 rpm 정도로 느리게

[†] 책임저자; 정회원, 한국전자통신연구원
E-mail : hermann@etri.re.kr
Tel : (042) 860-1142, FAX : (042) 860-5202

^{*} 한국전자통신연구원

[#] 이 논문은 2005 추계 소음진동 학술대회 우수논문으로 추천되었음.

하여 수행하였다. 본 논문의 경우는 디스크 위에 물리적인 홈 형태의 정보가 아닌 광학적으로 결정/비결정 상태의 정보를 읽게 되므로 디스크의 면은 물리적으로 편평한 것을 사용한다. 이때 개구와 디스크 사이의 간격을 근접장이 형성되는 100 nm 이하로 정밀하게 제어하면 광학적으로 정보를 읽거나 쓸 수 있게 된다. 원리는 원자현미경(AFM)과 비슷하나 차이점은 원자현미경의 경우 XY 스캐너를 사용하며 스캐닝(scanning)하는 방식으로 면적이 좁기 때문에 시편(미디어)의 기울어짐과 편평도에 영향을 많이 받지 않고 간극제어가 가능하지만, 디스크를 돌리는 형태의 정보저장 장치의 경우 원자현미경에서 사용하는 Z방향 구동기는 그 응답속도는 빠르나 작동범위가 매우 작은 이유로 인해서 디스크의 기울어짐과 면 진동을 극복하기에는 충분하지 않다. 따라서 본 논문에서는 이중 서보 제어를 통하여 개구형 근접장 헤드 장치가 개구와 시편과의 거리를 근접장이 형성되는 100 nm 이하의 간격으로 유지하도록 하는 제어하였다. 개구의 간극만 제어된다면 근접장에 의한 정보의 기록/재생이 용이하게 된다.

2. 시스템 구성

Fig. 1은 개구형 근접장 정보저장 헤드장치에 대해 구성의 개략도이다. 개구형 정보저장 장치는 개구와 미디어 사이의 간극을 일정하게 유지하면서 개구에서 나오는 레이저를 통해서 미디어에 정보를 기록/재생하는 장치이다. Fig. 1에서와 같이 레이저는 상단부 렌즈를 통해서 개구에 입사되며 개구를 통과해서 끝단으로 나오는 레이저를 통해서 미디어의 광

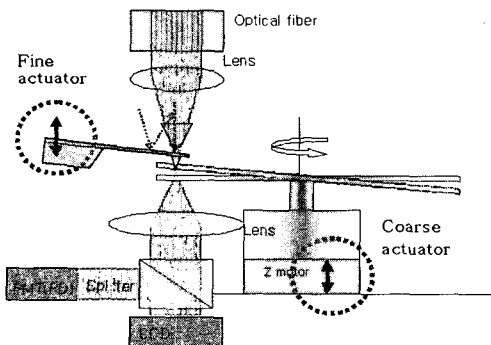


Fig. 1 The schematic of aperture type near-field data storage head

학적인 특성을 변화시키거나 광학적인 특성을 측정 하면서 정보를 기록/재생하게 된다. 이때 개구와 미디어와의 간극을 100 nm 이하로 일정하게 유지하는 것이 필요하다. 개구와 미디어의 간극은 개구 끝이 미디어와의 주고 받는 힘에 의해서 측정된다. 일반 원자현미경에서와 같이 외팔보의 앞 단의 개구가 미디어와 서로 당기거나 미는 힘이 발생하면 외팔보가 휘게 된다. 외팔보의 휘는 양은 외팔보 끝단에 조사되는 레이저가 PD(photo diode)로 반사되는 양을 측정하여 알 수 있다. 디스크가 돌 때 외팔보가 휘는 양에 따라 접촉력이 측정되며 측정되는 접촉력이 일정하도록 미세 구동기가 개구 틈을 아래/위로 움직이면서 간극이 제어 된다.

근접장을 이용하여 광학적인 정보를 얻기 위해 이 시스템은 투과모드로 신호를 얻는다. 실제 시스템은 Fig. 2에 나타나 있다. 일반적으로는 디스크가 기울어져 있으며 그 양은 약 $\pm 50 \mu\text{m}$ 정도이다. 여기서 광학적인 정렬이 틀어지지 않으면서도 간극이 100 nm 이하를 유지하는 정밀한 제어를 수행하기 위해서 위쪽에 장착된 미세 구동기로를 이용해서 빠른 속도로 표면의 오차를 추종하고, 아래쪽에 장착한 조동 구동기는 디스크의 기울어짐 및 면 진동을 추종하면서 보상한다.

이 실험을 위한 시스템 구성은 Fig. 2와 같다.

여기서 스피indle 모터는 디스크를 회전시키는 역할을 하며 스텝모터를 이용하여 구성하였다. 속도변화 범위는 0.01~80 RPM(revolution per minute)이며, 60 RPM의 경우 이를 선 속도로 환산하면 디스

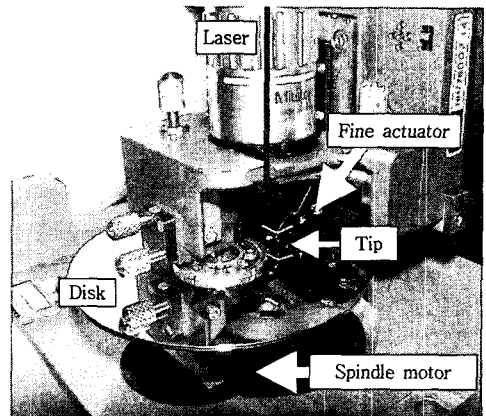


Fig. 2 Experimental setup of aperture type near-field data storage head

크 지름이 30 mm이므로 90.42 mm/sec가 된다. 만약 기록 마크가 90 nm라 가정을 할 경우 약 1 Mbps의 데이터 전송속도를 갖게 된다.

미세 구동기로는 PZT와 유연 힌지(flexure hinge)로 구성된 구동기를 사용하며 그 제어알고리즘은 아날로그 PID를 사용하였다. 조동 구동기 제어는 상용프로그램인 Labview를 기반으로 하는 디지털 제어를 PI제어를 이용하였고 이때 sampling rate는 10 msec이다.

작동방식은 다음 장에 서술되는 이중 서보 제어 방법이며, 작동순서는 먼저 개구를 미디어에 접근시키는데, 미세 구동기의 총 구동 범위에서 중간 위치가 될 때까지 접근한다. 그 이후에 조동 구동기 제어를 시작하고 디스크를 돌리면서 개구와 미디어 사이의 간극을 최종적으로 제어하게 된다. 조동 구동기는 디스크의 기울어짐을 보상하도록 제어가 되므로 미세 구동기는 평균적으로 중앙위치에서 표면의 형상 및 조동 구동기 제어에서 발생하는 오차에 대해서 제어를 한다.

3. 이중 서보 제어

디스크 형태의 미디어에 있는 정보를 읽기 위해서는 디스크가 한번 회전할 때 디스크의 기울어짐에 의한 것과 면 진동에 의해서 발생하는 오차요인에 대해서 헤드와 미디어와의 간극을 일정하게 유지하는 것이 필요하다. 이 논문에서는 디스크 표면 자체의 거칠기는 약 10 nm 이하로 된 표면을 사용하므로 디스크가 기울어짐 없이 이상적으로 회전한다고 하면 제어가 필요 없겠지만, 실제로는 Fig. 3과 같이 디스크가 움직일 때 디스크의 기울어짐과 면 진동에 의해 큰 구동범위를 갖는 구동기가 필요하고 디스크의 표면 거칠기를 극복할 수 있는 빠른 응답을 갖는 구

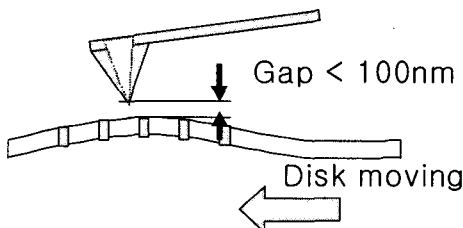


Fig. 3 Disk inclination and the gap variation between the aperture and the disk

동기도 필요하다.

이를 위해서 두 개의 구동기를 이용하여 미디어와 개구 사이의 간극(접촉력)을 제어하는 이중 서보 알고리즘을 제안한다. 본 시스템에서는 PZT 와 유연 힌지로 구성된 구동기를 이용하여 미세 구동기를 구성 하였으며 구동기의 동역학적 특성인 대역폭(bandwidth)은 약 1kHz정도이다. 미세 구동기의 제어속도는 빠른 편이지만 그 행정거리는 약 10 μm로 행정거리는 매우 짧다. 이 구동기의 동역학적 특성을 파악하기 위해서 Fig. 4에서와 같이 보드다이 어그램 (bode diagram)을 얻었다. 각 주파수 별로 sine sweep 방식을 이용해서 보드다이 어그램을 작성하였다. 결과에서 보듯이 미세 구동기는 약 200 Hz의 대역폭을 가지는 응답이 비교적 빠른 시스템으로 제어입력전압에 따른 구동기의 변위의 전달함수는 다음 식과 같다.

$$P_F(S) = \frac{D(S)}{V(S)} = \frac{0.1}{s/1800+1} \quad (1)$$

미세 구동기는 식 (1)과 같이 일차 동역학 식으로 근사 될 수 있으며 이를 이용해서 추후에 제어기를 설계한다.

한편 디스크가 빨리 회전할 때 비록 디스크의 기울어짐이 없다 하더라도 10Hz 이상의 빠른 속도 스캐닝을 하면 미소한 표면 형상들에 대해서 개구가 미디어 표면을 완벽하게 따라가지 않고 오차로 존재한다. 하지만, 이 논문에서는 광학신호로서 정보를

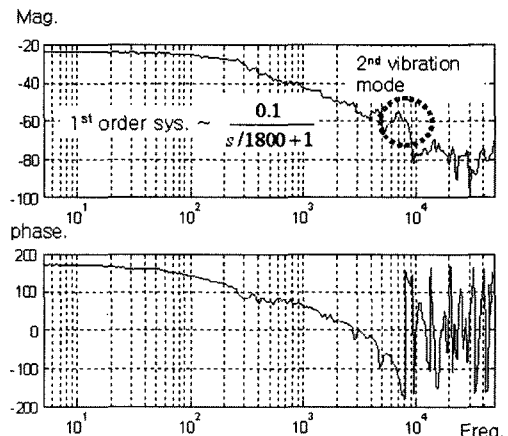


Fig. 4 Bode diagram of fine actuator : about 200 Hz bandwidth

기록/재생하므로 10 nm 수준의 형상은 정확하게 측정하지 않아도 큰 문제를 일으키진 않게 된다.

개구와 미디어 사이를 제어하는 미세 구동기는 그 작동범위가 약 10 μm 정도 이므로 디스크가 기울어진 양이 10 μm보다 크다면 개구가 미디어와의 간격이 많이 떨어져 근접장 형성 범위를 벗어나거나 틱이 행정거리를 넘어서 더 이상 후퇴할 수 없는 상황에서는 틱이 부러지게 된다. 따라서 비록 구동속도는 느리다 하더라도 행정 거리가 넓은 조동 구동기(coarse actuator)가 필요하다. 조동 구동기의 대역폭은 약 10 Hz로 다소 느리더라도 작동거리는 디스크가 기울어진 크기보다 충분히 크면 된다. 일반적인 기계 조립의 정밀도를 고려하여 이 논문에서는 +/- 100 μm의 작동범위를 갖는 조동 구동기를 구성하였다. Fig. 5는 조동 구동기의 동역학적 특성을 파악하기 위해 얻은 보드 다이어그램이다. 실험 결과에서 100 Hz 근처에서 부차공진이 발생하여 이득마진이 크지 않다. 이는 이 시스템에 질량이 큰 스피들 모터가 부착되어 있기 때문이다. 그러나, 조동 구동기는 디스크의 큰 기울어짐을 10 Hz 정도의 대역폭으로 추종하면 되므로 이 논문에서는 조동 구동기의 부차공진의 영향을 상쇄시키고 미세 구동기와의 대역폭 차이를 크게 조정하기 위해서 조동 구동기 앞에 저주파 필터를 구성하였다.

Fig. 5에서 조동 구동기 앞단에 설치한 저주파 필터를 표시하였고 전체적인 구동기 동역학은 식 (2)의 전달함수와 같이 매우 느린 일차 시스템의 특성을 지니게 된다.

$$P_c(S) = \frac{0.6}{s/60 + 1} \quad (2)$$

한편, 미세구동기와 조동 구동기의 대역폭 차이를 크게 하면 추후 이중 서보 제어를 설계할 때 두 구동기의 연결(coupling)을 적게 해주는 장점이 있다.

Fig. 6은 이중 서보 제어 알고리즘에 대한 다이어그램으로 이 시스템은 MISO 시스템으로 표현된다.

여기서 C_F 는 미세 구동기의 제어기, C_C 는 조동 구동기의 제어기 이며, P_F , P_C 는 각각 미세구동기와 조동 구동기의 전달함수이다.

두 개의 구동기가 같은 방향으로의 변위를 일으키면서 출력은 하나의 물리량인 접촉력이 된다. 하지

만 두 구동기의 동역학적 특성의 차이가 100배 정도가 되므로 각각의 구동기를 독립적으로 생각하여 제어기를 구성하였다.

여기서 두 개의 구동기를 연결하는 전달함수인

$$E(S) = \frac{1}{s/a + 1} \quad (3)$$

은 미세 구동기에서의 제어입력 값을 조동 구동기의 목표 값에 더해 주어 미세 구동기의 목표 값(set position)이 '0' 으로 하였을 때 미세 구동기의 구동위치가 항상 미세 구동기 전체 구동 범위 중 중앙을 기준이 되도록 만드는 역할을 한다. 이렇게 되면 미세 구동기가 빠르게 작동하면서도 평균적으로는 전체 구동 범위 중 중앙을 기준으로 제어가 된다. 따라서 디스크의 기울어짐이 크다 하더라도 조동 구동기는 디스크의 기울어진 형상을 따라 제어가 되게 되며 미세 구동기는 중심을 기준으로 표면의 거칠기 및 조동 구동기가 미처 제어할 수 없는 오차에 해당

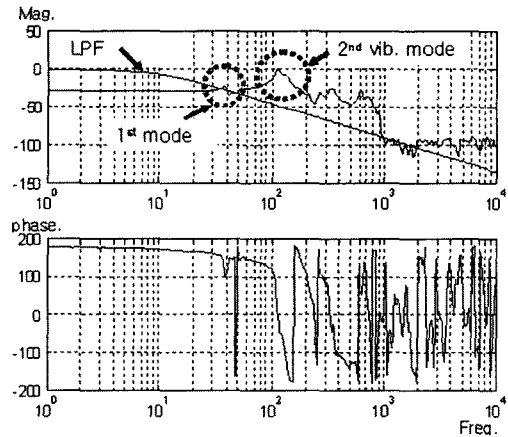


Fig. 5 Bode diagram of coarse actuator

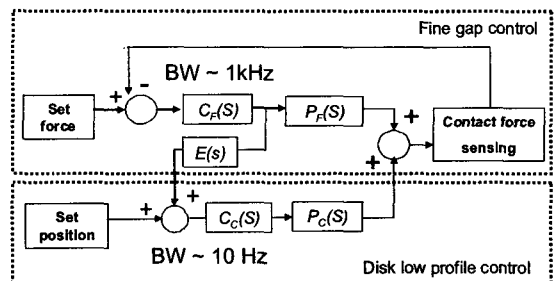


Fig. 6 Block diagram of dual servo algorithm

하는 양을 제어하면서 전체적으로는 팁과 미디어 사이의 간격이 정밀하게 제어가 된다. 여기서 'a' 값은 미세 구동기의 제어 입력 값을 얼마나 빠르게 조동 구동기의 목표 값에 알려주는가를 결정하는 상수로 'a' 값이 크면 미세 구동기의 역할이 커지고 'a' 값이 작아지면 조동 구동기의 역할이 커지게 된다. 이 실험에서는 'a' 값은 80으로 하여 조동 구동기의 역할을 조금 크게 하도록 조정하였다.

미세 구동기와 조동 구동기 각각의 앞 단에 위치하는 제어기는 모두 PID제어기를 사용하였으며 제어기의 이득(gain) 값은 시행착오 방법을 이용하여 얻었다.

4. 실험결과

스핀들 모터를 통해 디스크를 정지 상태에서부터 각각 2.5 rpm, 5 rpm, 10 rpm, 20 rpm, 40 rpm으로 구동시켜 보았다. 이 실험장치에서 디스크의 지름이 30 mm이므로 2.5 rpm의 경우 선 속도로 환산하면 3.925 mm/sec 된다. Fig. 7에서는 디스크 각각의 회전속도에 따른 미세 구동기와 조동 구동기의

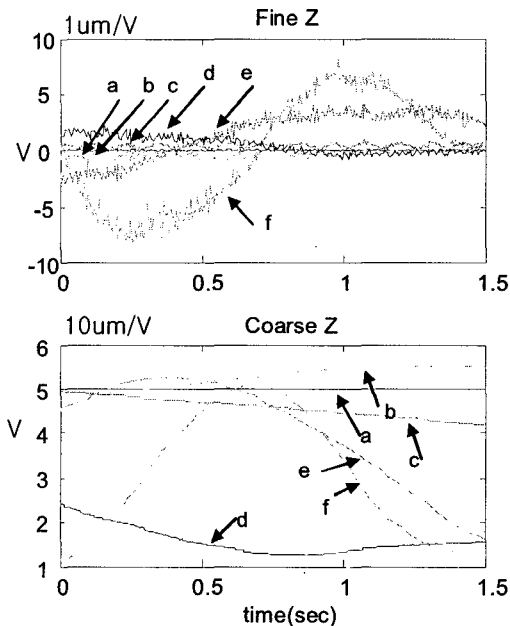


Fig. 7 Displacements of fine actuator and coarse actuator, respectively : (a) 0 rpm, (b) 2.5 rpm, (c) 5 rpm, (d) 10 rpm, (e) 20 rpm, (f) 40 rpm

변위를 나타내고 있다. 미세구동기와 조동 구동기에는 구동기의 변위를 측정하기 위한 정전 용량식 간극 센서가 있어서 각각 1 um/V, 10 um/V의 측정범위를 갖는다. 디스크가 정지해있을 때에는 두 구동기 모두 정지상태에 있는데, 주변의 진동 외란에 대한 제어를 하고 있기 때문에 정지 상태에서도 미세 구동기는 미소한 양으로 움직이면서 외란에 대한 제어를 하고 있다(Fig. 7(a)).

디스크가 회전하기 시작하고 그 속도가 증가됨에 따라 각각의 구동기의 변위는 커지게 된다. 디스크가 1.5초 동안에 1회전하는 (f)의 경우 최대 크기가 되고 더 빠른 회전을 하는 경우 조동 구동기의 변위는 변화가 없지만 제어기의 위상 지연에 의해서 미세 구동기의 변위가 점점 커지게 된다. 이는 이중 서보 제어에서 조동 구동기의 제어 이득을 증가시키면 약간 줄일 수 있으나 팁과 미디어 사이의 간극 오차가 커지므로 바람직하지 않다.

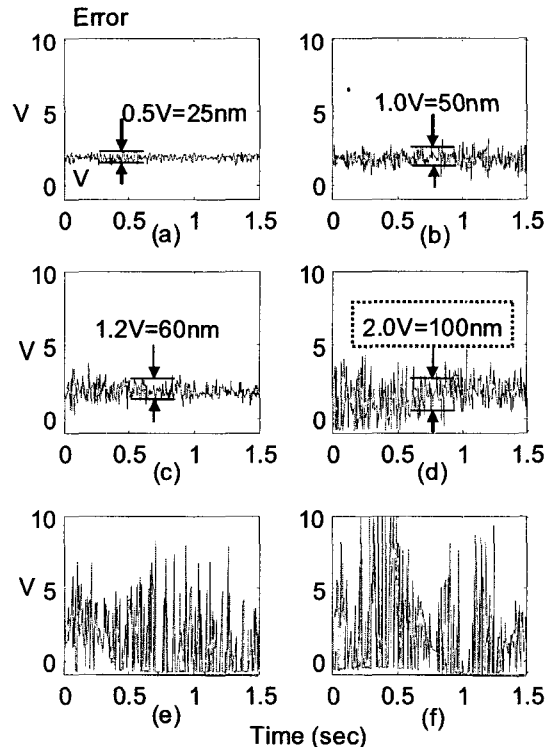


Fig. 8 Gap error between the aperture and the disk when disk is rotating : (a) 0 rpm, (b) 2.5 rpm, (c) 5 rpm, (d) 10 rpm, (e) 20 rpm, (f) 40 rpm, Near-field region of 100 nm is preserved within 10 rpm rotating speed

Fig. 8은 각각의 디스크 회전 속도에 따른 팁과 미디어 사이의 오차에 대한 실험결과이다. 간극의 오차는 laser diode(LD) / photo diode(PD)를 장치를 이용하여 측정하였으며 미세 구동기가 250 nm 움직일 때 PD에서의 측정되는 오차 값은 5 V가 측정된다. 실험결과에서 보듯이 정지상태에서는 PD에서 측정되는 오차는 약 0.5 V로 이를 변위로 환산하면 약 25 nm 정도이다. 디스크의 속도를 점점 빠르게 하면 오차가 커지는데, Fig. 8의 (d)에서 알 수 있듯이 10 rpm 이상의 속도가 되면 100 nm 이상의 오차를 갖게 되므로 근접장 영역을 벗어나서 제어가 된다고 볼 수 있다. 회전속도가 빠른 (e), (f)의 경우에도 팁이 부러지지는 않지만 개구와 미디어 사이의 간격이 제대로 제어가 되지 않으므로 정보저장 장치에는 사용할 수 없게 된다. 참고로 이 실험에서 디스크의 지름은 30 mm이며 100 nm 이하의 오차를 갖는 속도인 10 rpm은 선속도로 환산하면 약 15.7 mm/sec가 된다.

5. 결 론

이 논문에서는 능동제어 방법을 이용하여 개구형 근접장 헤드가 미디어 표면과 100 nm 이하의 간격을 유지하면서 제어되는 방법을 소개하였다. 이중 서보 제어 방법을 적용하기 위해서 각 구동기의 동역학적 특성을 살펴보았으며, 이중 서보 제어를 통해서 개구가 미디어와의 간격이 100 nm 이하로 근접장이 형성되는 제어가 가능한 선속도는 15.7 mm/sec의 실험결과를 얻었다. 주변 진동으로 말미암아 속도의 제한이 있었으나 향후 속도를 높이고 광학적인 신호도 함께 얻는 것을 연구를 수행 하고자 한다.

후 기

이 논문은 산업자원부 신기술 융합사업 나노 광 정보저장 기술개발 과제로 진행되었음.

참 고 문 헌

- (1) Betzig, E., Trautman, J. K., Wolfe, R., Gyorgy, E. M., Finn, P. L., Kryder, M. H. and Cahang, C. H. 1992, "Near-field Magneto-optic and High Density Data Storage", *Appl. Phys. Lett.* Vol. 61, pp.142~144.
- (2) Terris, B. D., Mamin, H. J. and Rugar, D., 1996, "Near-field Optical Data Storage," *Appl. Phys. Lett.* Vol. 68, pp.141~143.
- (3) Makakzu Kirata, Manabu Oumi, Kunio Nakajima and Toshifumi Ohkubo, 2005, "Near Field Optical Flying Head with Protruding Aperture and Its Fabrication," *JJAP*, Vol. 44, No. 5b, pp. 3519~3523.
- (4) Ohkubo, T., Tanaka, K., Hirota, T., Ito, K., Niw, T., Maeda, H., Shinohara, Y., Mitsuoka, Y. and Nakajima, K., 2002, "Readout Signal Evaluation of Optical Flying Head Slider with Visible Light-wave Guide Flexure," *Microsystem technologies*, Vol. 8, pp. 212~219
- (5) Kimio Nakamura, Jajime Koyanagi and Sumio Hosaka, 1998, "Narrow Pitchtracking Using Optical Head for Recording with AFM," *JJAP*, Vol. 37, pp. 2271~2273.