

# 외란 관측기를 이용한 근접장 기록 시스템의 트래킹 서보 성능 향상

## Improvement of Tracking Servo Performance in SIL based Near-field Recording using Disturbance Observer

강민석\*·김중곤\*·신원호\*·정준\*\*·박노철†·양현석\*·박영필\*

Min-Seok Kang, Joong-Gon Kim, Won-Ho Shin, Jun Jeong, No-Cheol Park, Hyun-Seok Yang and Young-Pil Park

**Key Words** : Near-field Recording(근접장 기록), Tracking Servo(트랙추종제어), Disturbance Observer(외란 관측기), Internal Model Principle(내부 모델 원리).

### ABSTRACT

The solid immersion lens (SIL) based near-field recording (NFR) system is considered as one of the high density optical data storage system. For the NFR servo system, tracking servo control is a difficult technology to maintain extremely small gap between SIL and media within one twentieth. This is because the track pitch is decreased for increasing the recording density. In this paper, we propose disturbance observer (DOB) and internal model principle (IMP) for disturbance rejection due to eccentricity of disk. The performance of tracking controller using DOB is increased by about 85%, 94%, 97% using Q filters that have bandwidths of 50Hz, 125Hz, 250Hz, respectively. Moreover, IMP based controller is effectively reduced the residual error.

## 1. 서론

정보화 사회의 발전에 따라 사용하는 정보의 양이 기하급수적으로 증가하고 있다. 이에 따라 정보저장 기기의 저장용량도 계속하여 증가하고 있다. 현재 고용량 광 정보저장장치인 Blu-ray 디스크가 상용화되었지만, HD 급 영상이 대중화됨에 따라 Blu-ray 디스크 이상의 용량이 요구될 것이다. Solid Immersion Lens(SIL) 기반의 근접장 기록 시스템은 기존의 CD, DVD, BD 등 상용화된 광디스크 드라이브(optical disk drive)와 광학적, 기계적으로 많은 부분을 공유하고 있으며, 파장이 405nm 인 블루 레이저와 굴절률(refractive index)이 2.804 인 초구면 SIL(super-hemispherical SIL)을 사용하여 회절 한계를 극복하여, 기존의 광 정보 저장 장치 보다 큰 NA(numerical aperture)를 구현할 수 있다. 이를 통해, 빔의 Spot size 를 줄여 디스크 기록밀도를 높임으로써 120mm 의 지름을 가지는 디스크의 표면당 100 기가 바이트 이상의 용량을 얻을 수 있다.<sup>(1)</sup>

광 정보저장장치에서 디스크의 데이터를 안정적으로 재생하기 위해서는 디스크와 대물렌즈의 거리를 유지하는 포커싱 제어와 디스크 트랙을 추종하는 트래킹 제어가 이루어져야 한다. NFR 시스템에서는 근접내에서의 포커싱 방향의 제어를 깎서보 제어라고 한다. 시스템의 특성 상, 안정적인 재생을 위해 SIL 과 디스크 사이의 50 nm 이하의 갭을 유지하면서,

디스크 용량의 증가에 따라 좁아진 트랙을 추종해야 하는 난제가 존재한다.

본 논문에서는 NFR 트래킹 서보의 성능을 증가시키기 위해 외란 관측기(disturbance observer, DOB)와 내부모델원리(internal model principle, IMP)를 적용하였다. DOB 는 측정된 출력과 공칭 모델의 역함수를 통해 추측한 제어입력과 실제 제어 모델에 적용된 제어 입력 차이를 외란으로 하여 그 외란을 제거하는 추가 입력 제어기의 일종으로, 외란 제거에 널리 사용되는 제어기 중 하나이다.<sup>(2,3)</sup> 트래킹 서보 성능에 가장 큰 영향을 미치는 외란은 디스크 편심에 의한 디스크 래디얼(radial) 방향으로의 트랙 런아웃(run-out)이다. 디스크의 편심은 디스크의 중심과 디스크 회전 중심이 다르기 때문에 발생하며, 편심에 의한 외란을 제거하기 위해 DOB 를 적용하였다. IMP 는 특정 주파수 범위의 주기적인 외란을 제거하는데 효과적으로 사용할 수가 있다.<sup>(4)</sup> 디스크 편심에 의한 외란은 디스크 회전 주파수와 같은 주파수를 가지므로 회전 주파수 영역의 외란을 제거하기 위해 IMP 를 추가로 적용하였다. DOB 와 IMP 의 외란 저감 성능을 확인하기 위해 트래킹 서보 시뮬레이션을 통해 잔류오차의 감소를 확인하였다.

## 2. NFR 시스템

Fig.1 은 NFR 서보 시스템의 모식도이다. NFR 서보 시스템의 플랜트는 SIL 과 대물렌즈로 구성된 SIL assembly 가 부착된 VCM 액추에이터와 포커싱방향으로는 0.09A/V, 트래킹 방향으로는 0.04A/V 의 이득을 가지는 전류 앰프로 구성되어 있다. 광신호는 광학 시스템과 플랜트를 지나 광 609 검파기(photo detector, PD)에서 측정된다. NFR 서보

† 박노철 ; 정보저장기기 연구센터

E-mail : pnch@yonsei.ac.kr

Tel : (02) 2123-4677

\* 연세대학교 정보저장기기 연구센터

\*\* 동양공업전문대학교 자동화시스템과

시스템의 제어기로는 dSPACE 를 사용하였다.

주파수 응답특성 측정장비로 LDV(laser doppler vibrometer)와 DSA (dynamic signal analyzer)를 사용하였다. 플랜트의 0 ~ 50kHz 주파수 영역에서의 주파수 응답 특성은 Fig. 2 에서 보는 바와 같다. 포커싱 방향으로의 플랜트의 전달함수는 식(1)과 같고, 트래킹 방향의 플랜트의 전달함수는 식(2)와 같다.

$$\frac{V}{X} = \frac{2.357e007}{s^2 + 183.7 s + 1.777e005} (\mu\text{m}/V) \quad (1)$$

$$\frac{V}{X} = \frac{1.074e007}{s^2 + 174.9 s + 1.78e005} (\mu\text{m}/V) \quad (2)$$

### 3. 제어기 설계

#### 3.1 외란 관측기(Disturbance Observer)

DOB 는 공칭 모델의 역함수 모델과 Q 필터로 구성되어 있다. Q 필터는 저역 주파수 통과 필터의 형태를 취하고 있기 때문에 잡음 제거의 역할도 가지고 있다. Fig.3 는 DOB 의 블록 선도이며 P(s), P<sub>n</sub>(s), C(s), Q(s) 는 각각 실제 플랜트, 공칭 모델, 기본제어기, Q 필터를 의미하며, r(s), Y(s), U(s), ζ(s), D(s), D\*(s)는 각각 제어 목표값, 시스템 출력, 제어 입력, 측정 노이즈, 외란, 측정 외란을 의미한다. 여기서, 시스템 출력 Y(s)는 식(3)와 같이 나타낼 수 있으며, 제어 입력, 외란, 측정 노이즈에 대한 전달함수는 각각 식(4),(5),(6)으로 나타낼 수 있다.

$$Y(s) = G_{uy}U(s) + G_{dy}D(s) + G_{\zeta y}\zeta(s) \quad (3)$$

$$G_{uy} = \frac{P_a P_n}{Q(P_a - P_n) + P_n} \quad (4)$$

$$G_{dy} = \frac{P_a P_n (1 - Q)}{Q(P_a - P_n) + P_n} \quad (5)$$

$$G_{\zeta y} = \frac{P_a Q}{Q(P_a - P_n) + P_n} \quad (6)$$

식(5)로부터 저주파 영역에서 Q(s)가 1에 가까울수록, G<sub>dy</sub>는 0에 가까워져 외란을 제거할 수 있으며, 식(6)으로부터 고주파 영역에서 Q(s)가 0에 가까울수록 G<sub>zy</sub>가 0에 가까워져 측정 노이즈를 제거할 수 있음을 알 수 있다. 그러므로 Q 필터 설계 시, 외란 제거와 측정 노이즈 제거를 모두 고려하여 설계하여야 한다.

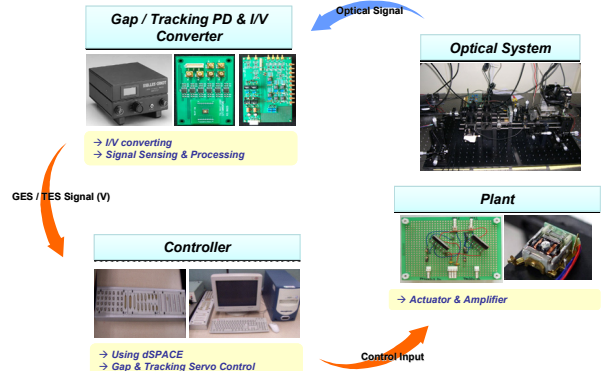
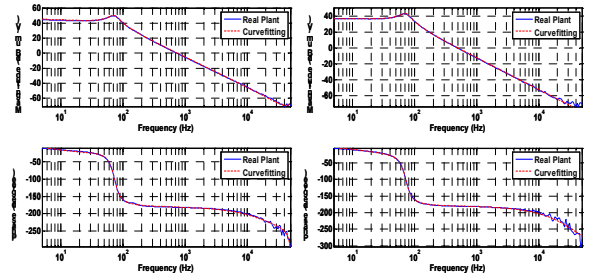


Fig.1 Schematic diagram of NFR servo system



(a) Focusing direction (b) Tracking direction

Fig.2 Frequency response of modeling plant and the real plant

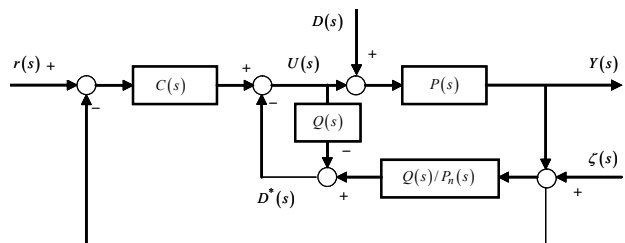
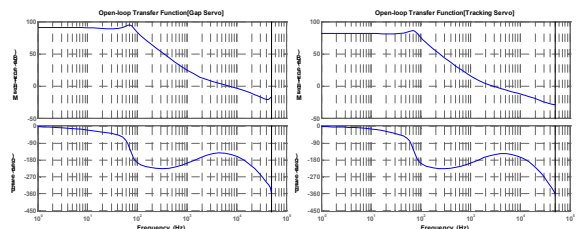


Fig.3 Block diagram of DOB



(a) Gap servo (b) Tracking servo

Fig.4 Open-loop transfer function of base controller

#### 3.2 제어기 설계

NFR 서보 시스템의 기본제어기로는 앞섬 보상기 (lead compensator)와 뒷섬 보상기(lag compensator)를 사용하였다. 설계한 제어기의 샘플링 주파수는 100kHz 이며, 갭서보 방향의 개루프 전

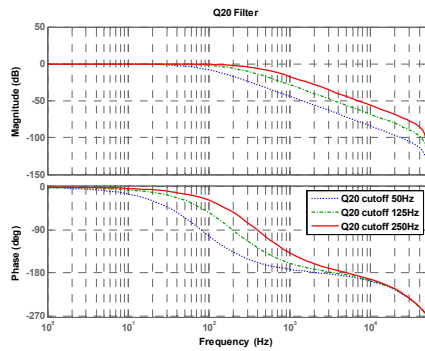


Fig.5 Design of Q filter

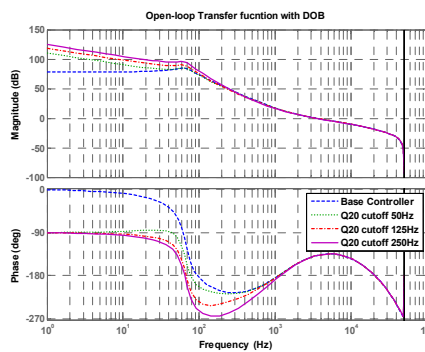


Fig.6 Open-loop transfer function for tracking servo controller using DOB

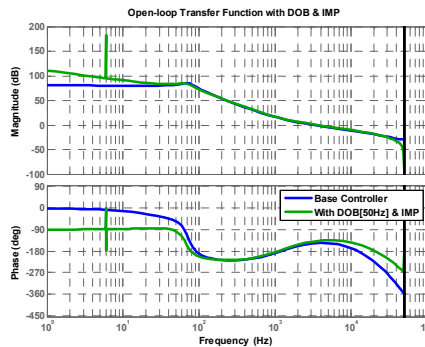


Fig.7 Open-loop transfer function for tracking servo controller using DOB and IMP

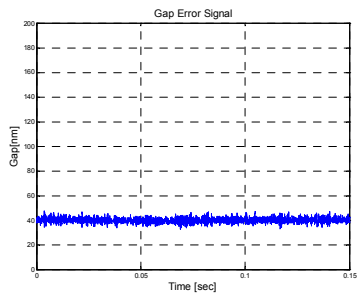


Fig.8 Experiment result of gap servo

달함수의 크기는 90dB 이고, 트래킹 방향의 전달함수의 크기는 80dB 이다. 또한, 위상 여유가 30 도 이상이 되도록 기본제어기를 설계하였으며, Fig.4 는 갭 서보 기본 제어기와 트래킹 서보 기본 제어기의 개루프 전달함수이다.

Fig.5 은 DOB 를 트래킹 기본제어기에 적용하기 위해, 설계한 Q 필터 이다. 각각 50/125/250Hz 의 대역폭을 가진 2 차 저주파 대역 통과 필터의 형태를 가지고 있다. Fig.7 은 DOB 를 트래킹 서보 기본 제어기에 적용한 개루프 전달함수이다.

## 4. 실험 및 시뮬레이션 결과

### 4.1 갭 서보 실험

3.2 에서 설계한 갭 서보 기본제어기를 사용하여 갭 서보 실험을 실시하였다. 실험 조건은 디스크 회전 속도는 360 rpm 이며 디스크 외란이 약 25 $\mu$ m 인 상태에서 목표 갭을 40 nm 로 설정하였다. Fig.8 은 갭 서보 실험 결과이며 잔류오차는 약  $\pm 4$ nm 이다.

### 4.2 트래킹 서보 시뮬레이션

NFR 트래킹 서보 시스템에 DOB 와 IMP 를 적용하여 트래킹 서보 시뮬레이션을 실시하였다. 갭 서보 실험 결과를 통해, 360rpm 에서 편심량이 약 49 $\mu$ m 이며, 트래킹 에러신호의 크기가 약  $\pm 1$ V 임을 확인하였다. 이 신호를 기준으로 시뮬레이션을 실시하였다. Fig.9 은 DOB 를 적용에 대한 트래킹 시뮬레이션 결과이다. 기본제어기만 사용했을 때에 비해, 잔류오차가 감소 했음을 확인할 수 있고, Table.1 에 시뮬레이션 결과를 정리하였다. Fig.10 에서 IMP 에 의해 시간이 흐를수록 잔류오차가 감소함을 확인할 수 있다. 또한 DOB 와 IMP 를 동시에 사용했을 경우, DOB 만 사용했을 경우 보다 잔류오차가 감소 하는 것을 확인할 수 있다.

## 5. 결론

트래킹 서보 시스템 성능에 가장 큰 영향을 미치는 외란은 디스크 편심에 의한 디스크 래디얼(radial) 방향으로의 트랙 런아웃(run-out)이다. 이 편심을 효과적으로 억압하기 위한 방안으로, DOB 를 NFR 트래킹 서보 시스템에 적용하였다. 그 결과, 전체 제어 시스템의 대역폭, 이득 여유, 위상여유를 크게 변화시키지 않으면서 저주파 영역에서의 개루프 전달함수의 크기를 증가시켜 편심에 의한 외란의 영향을 억제하여, 기본제어기만 사용했을 경우 보다 잔류 오차를 감소시킬 수 있었다. 덧붙여, 회전 주파

수 영역성분을 IMP 를 적용하여 잔류오차를 더 감소시킬 수 있었다. 본 논문에서는 DOB 와 IMP 를 시뮬레이션에만 적용하였지만, 실제 트래킹 서보 시스템에서의 효과를 확인하기 위해 DOB 와 IMP 를 트래킹 서보 실험에 적용할 것이다.

### 참 고 문 헌

- (1) F. Zijp, M. van der Mark, C. Verschuren, J. I. Lee, J. van den Eerenbeemd, et al., 2005, "High Density Near Field Optical Recording With a Solid Immersion Lens, Conventional Actuator, and a Robust Air Gap Servo", IEEE Trans. J. Magn., Vol. 41, pp. 1042-1046.
- (2) Yang, K. G., Choi, Y. G., Chung, W. K. 2005, "On the Tracking Performance Improvement of Optical Disk Drive Servo Systems Using Error-Based Disturbance Observer", IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 52, NO. 1, pp. 270-279
- (3) Jung, R. R., Doh, T. Y. and Chung, M. J. 2001, "Design of Disturbance Observer for Track-following Controller of Optical Disk Drive", Proceedings of the International Conference on Control, Automation and Systems, pp. 563-566
- (4) Jeong J., Kim J.G., Park N.C, Yang H.S., Park Y.P, 2007, "Disk Vibration and Eccentricity Compensation of Near Field Recording Systems Based on the Internal Model Principle", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering. Vol.17, No.6, pp.539-546.

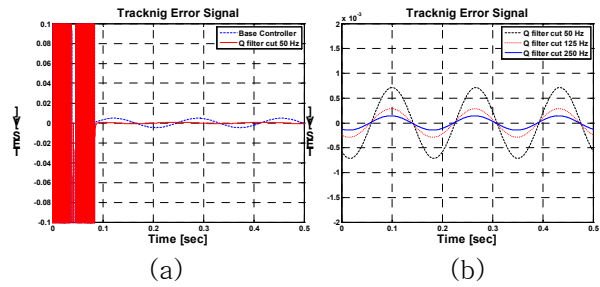


Fig.9 Simulation results of tracking servo without DOB and with DOB (a) base controller / with DOB[50Hz] (b) with DOB[50,125,250Hz]

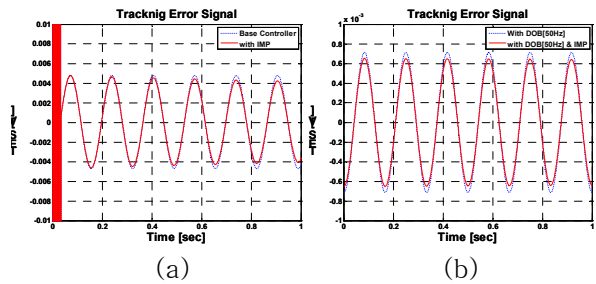


Fig.10 Simulation results of tracking servo with DOB and IMP (a) base controller / with IMP (b) with DOB[50Hz] / with DOB[50Hz] and IMP

Table.1 Simulation results of tracking servo without DOB and with DOB

Controller	Residual error[mV]
Base Controller	9.50
DOB [ 50Hz ]	1.43
DOB [ 125Hz ]	0.574
DOB [ 250HZ ]	0.288