

# SIL 기반 근접장 기록 시스템에 대한 충격 대응 피드포워드 능동제어 알고리즘 설계

## Design of Anti-shock control Algorithm using Feedforward controller for SIL based Near Field Recording system

신원호<sup>1</sup>, 김종곤<sup>2</sup>, 황현우<sup>1</sup>, 박경수<sup>2</sup>, \*#박노철<sup>1</sup>, 양현석<sup>1</sup>, 박영필<sup>1</sup>

Won-Ho Shin<sup>1</sup>, Jung-Gon Kim<sup>2</sup>, Hyun-Woo Hwang<sup>1</sup>, Kyoung-Su Park<sup>2</sup>, \*# No-cheol Park(pnch@yonsei.ac.kr)<sup>1</sup>, Hyungseok Yang<sup>1</sup>, Young-Pil Park<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 연세대학교 기계공학과, <sup>2</sup> 연세대학교 정보저장기기 연구센터

Key words : SIL(solid immersion lens), accelerometer, feedforward control, near-field recording

### 1. 서론

고용량의 데이터를 저장하기 위해 holographic digital data storage (HDD), super resolution near field structure (Super-RENS), solid immersion lens (SIL) 기반 근접장 기록 장치와 같은 많은 연구들이 진행되고 있다. 이러한 연구 중에 개구수 (numerical aperture: NA)가 큰 SIL 과 파장( $\lambda$ )이 405 nm 인 블루 레이저 다이오드를 기반으로 한 근접장 기록 (near-field recording: NFR) 시스템이 차세대 광 저장 장치로 각광 받고 있다. [1]

NFR 서보 시스템에서는 정보를 기록 및 저장하기 위해서 디스크의 표면과 SIL 의 바닥 면 사이의 간극을 블루 레이저 파장의 4 분의 1 ( $\lambda/4$ )이하로 유지해야 한다. [2] 이 간극은 100 nm 이하로 매우 작기 때문에 사용 환경에서 발생할 수 있는 외부적인 충격에 대해 취약하다. 외부적인 충격은 디스크 회전 시 발생하는 축 방향 외란 및 디스크 표면의 스크래치 등으로 발생할 수 있으며, 충격 인가 시 디스크와 SIL 의 충돌이 일어나 데이터의 손상 및 SIL 의 파손 등의 문제를 야기하여 시스템의 안정성을 저하시킨다. 외부적 충격에 의해 발생하는 문제를 해결하기 위해서는 충격인가 시 빠르게 대응할 수 있는 시스템이 필요한 시점이다.

본 연구에서는 외부 충격에 피드포워드 제어기를 사용하여 대충격 제어 알고리즘을 제안하였다. [3] 외부적인 충격이 없을 때에는 lead-lag 제어기를 사용하여 피드백 제어를 수행하다가 외부적인 충격인가 시 가속도계를 통해 충격을 보다 빠르게 인식하고 그에 따라 대응하는 피드포워드 제어기가 작동하도록 하여 디스크와 SIL 의 충돌을 회피하도록 하였다. 가속도계로 외부적인 충격을 인식하여 충격 신호를 피드포워드 제어기 전달한다. [4] 피드포워드 제어기는 전달받은 충격 신호의 속도를 이용하여 충격의 크기를 예측하고 이에 따라 제어기 입력값을 조절하여 충격에 대응하도록 하였다. 이와 같이 피드백 제어와 피드포워드 제어를 사용하여 대충격 제어시스템의 성능이 향상됨을 검증하였다.

### 2. NFR 서보 시스템 설계

NFR 시스템은 광학 시스템과 서보 시스템으로 나눌 수 있다. 광학 시스템은 BS (beam splitter), PBS (polarizing beam splitter), QWP (quarter wave plate) 등으로 구성되어 있으며, 빔이 laser diode 에서 전파되어 광학 시스템을 통해 개구수 (NA)가 1.84 인 SIL 의 바닥면에 입사한다. SIL 을 통과하여 디스크에 반사되어 빔은 photo diode 에 센싱된다. 디스크와 SIL 의 간극에 따라 반사되는 빔의 광량이 달라지기 때문에 이를 통해 간극을 측정한다.

NFR 서보 시스템 설계에 앞서 플랜트의 동특성을 파악하였다. 플랜트는 VCM 액츄에이터와 전류 증폭기로 구성되어 있으며, 동특성을 sine-sweep method 로 구하면 전달 함수는 식(1)과 같다.

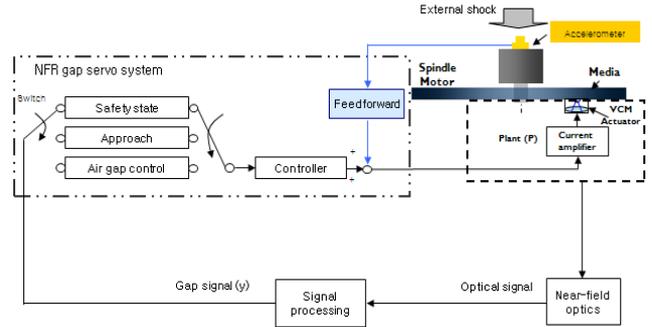


Fig. 1 Schematic diagram of the proposed NFR servo system using feedforward controller

$$G(s) = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} = \frac{132.64 \times 1.777 \times 10^5}{s^2 + 183.7s + 1.777 \times 10^5} \left( \frac{\mu m}{V} \right) \quad (1)$$

여기서,  $\zeta$ ,  $\omega_n$  그리고  $K$  는 각각 감쇠비, 공진 주파수, Open-loop 게인이다.

플랜트의 동특성을 바탕으로 제어기를 설계하였다. 설계한 제어기는 그림 1 와 같이 피드백 제어기와 피드포워드 제어기로 구성하였다. 피드백 제어기는 SISO-tool 를 사용하여 lead-lag 제어기를 설계하였으며, NFR 서보 시스템의 안정성을 확보할 수 있도록 이득여유, 위상여유, 대역폭, 그리고 Open-loop 게인을 설계하였다. 안정성을 위한 위상여유는 30 deg 에서 40 deg 이며, Open-loop 게인은 목표 간극 2 nm 와 디스크의 외란 55  $\mu m$  을 고려하여 95 dB 이상 되어야 한다. 설계한 개루프 전달 함수와 설계 파라미터는 그림 2 과 표 1 로 나타났다.

피드포워드 제어기는 그림 1 에서 보는 것과 같이 외부적인 충격이 들어오는 지점에서 가속도계로 충격을 인식하여 충격 신호가 제어기로 들어가 피드포워드 제어기를 가동하도록 설계하였다. 피드포워드 제어기는 일정한 시간인  $\Delta T$  범위 내에서 들어오는 충격 신호의 속도 ( $\Delta G/\Delta T$ )를 계산하여 충격의 크기를 예측하여 그에 비례하게 피드포워드 제어 출력값을 조절한다. 출력값은 예측된 충격의 크기가 커질수록 그에 비례하여 피드포워드 제어기를 통해 내보낸다.

### 3. NFR 시스템에 대한 충격 대응 시뮬레이션

앞에서 설계한 NFR 시스템에 시뮬링을 이용하여 외부적 충격 인가하여 간극제어 시뮬레이션을 진행하였다. 대상 플랜트가 초기 위치에서 목표 간극으로 접근하는 어프로치 모드를 지나 일정한 간극을 유지하는 간극 제어 모드에서 피드포워드 제어기를 성능을 검증하였다. 즉, 간극을 30 nm 로 유지하고 300 rpm 으로 회전하고 있을 때에 외부적인 충격의 크기와 지속 시간이 각각 2.2 G, 10 ms 인 half sine 신호로 시스템에 인가하여 시뮬레이션을 진행하였다. 피드백 제어기를 기본 제어기로 사용하고 피드포워드

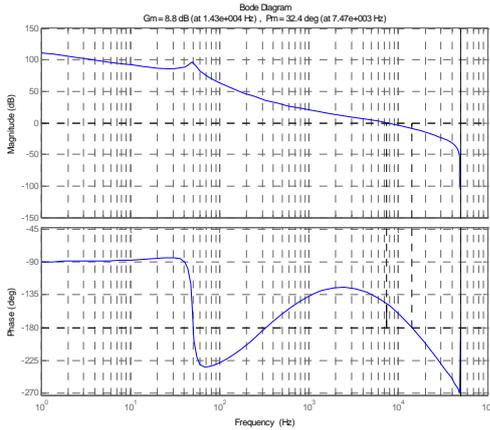


Fig. 2 Open loop transfer function of the air gap controller using lead-lag type

Table 1 Dynamic characteristic of the open loop transfer function using base gap air controller

| Parameter         | Value            |
|-------------------|------------------|
| Cut-off frequency | 7.62 kHz         |
| OL gain           | Over 95 dB [5Hz] |
| Gain margin       | 8.8 dB           |
| Phase margin      | 32.4 deg         |

제어기의 유무에 따라 충격이 들어올 때의 간극 제어 시뮬레이션 결과는 그림 3 과 4 와 같다. 그림 3 은 피드포워드 제어기를 사용하지 않았을 때의 결과로 충격으로 인해 디스크와 SIL 이 충돌하는 것을 볼 수 있다. 충격에 의해 디스크와 SIL 의 간격이 떨어졌다가 가까이 접근하면서 일정한 간극을 유지해야 하지만 목표 간극을 벗어나 디스크와 SIL 의 충돌이 발생하여 간극 제어 모드에서 빠지는 것을 볼 수 있다. 그러나 피드포워드 제어기를 사용하면 그림 4 와 같이 충격 시에도 최소 간극이 14.39 nm 까지로 SIL 과 디스크의 간격이 줄어 들지만 충돌하지 않고 일정시간 후에 안정을 되찾아 간극 제어 모드를 유지하고 있는 것을 볼 수 있다. 피드포워드 제어기를 사용함으로써 디스크와 SIL 의 충돌을 방지할 수 있었다.

설계한 NFR 서보 시스템에 대한 시뮬레이션 결과 기본 제어기를 사용했을 때보다 기본 제어기를 포함하여 피드포워드 제어기를 동시에 사용하였을 때 외부적인 충격에 보다 효과적으로 대응할 수 있다는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 SIL 을 기반으로 한 NFR 시스템에 대해 외부적인 충격 인가 시 디스크와 SIL 의 충동을 방지하는 제어 알고리즘을 제안하였다. 피드백 제어를 기본 제어기로 사용하여 디스크와 SIL 의 간극을 일정하게 유지하다가 시스템에 충격 인가시 기본 제어기만 사용하였을 때와 제안한 피드포워드 제어기를 동시에 사용하였을 때의 시스템의 안정성을 검증하였다. 그 결과 외부적인 충격이 시스템에 인가될 때 피드포워드 제어기가 가동되어 피드백 제어만 작동할 때보다 충격을 신속하게 하여 그에 따라 제어 출력값을 조절하여 디스크와 SIL 의 충동을 방지할 수 있다는 것을 시뮬레이션으로 확인하였다. 제안한 피드포워드 제어기를 사용하여 외부적인 충격에 대해 보다 능동적으로 대응하여 디스크와 SIL 의 충동에 의한 데이터의 손상 및 파손을 방지할 수 있는 안정적인 NFR 서보 시스템을 구현하였다.

#### 후기

이 논문은 2009 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. R17-2008-040-01001-0).

#### 참고문헌

1. T. Ishimoto, K. Saito, M. Shinoda, T. Kondo, A. Nakaoki, and M. Yamamoto, "Gap Servo System for a Biaxial Device Using an Optical Gap Signal in a Near Field Readout System," Jpn. J. Appl. Phys. vol 42, no. 5, pp. 2719-2724, May. 2003
2. T. Ishimoto, T. Matsui, S.M. Kim, K. Saito, K. Takagi, S. Haga, A. Nakaoki, and M. Yamamoto, "Technologies for Removability in a Near-Field Optical Disc System," in Proc. Int. Conf. Optical Data Storage, 2006, pp. 62820C-1- 62820C-11.
3. M.T. White and M. Tomizuka, "Increased Disturbance Rejection in Magnetic Disk Drives by Acceleration Feedforward Control and Parameter Adaptation", Control Eng. Practice, Voi. 5, No. 6, pp. 741-751, 1997
4. H-S Na and Y. Park, "An Adaptive Feedforward Controller for Rejection of Periodic Disturbances" Journal of Sound and Vibration 201(4). Pp. 427-435, 1997

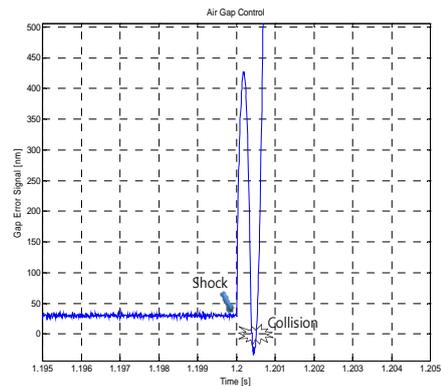


Fig. 3 Simulation results of air gap control using base air gap controller for SIL based NFR system

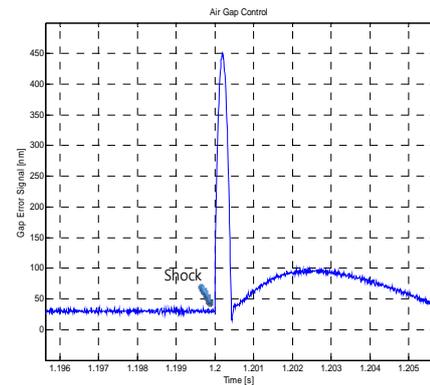


Fig. 4 Simulation results of air gap control using base air gap controller and proposed feedforward controller for SIL based NFR system