

SIL 기반 근접장 시스템에 대한 충격 대응 제어 알고리즘 설계

Design of Anti-Shock control Algorithm for SIL-Based Near-Field Recording System

김중곤** · 신원호* · 황현우* · 박경수** · 박노철† · 양현석* · 박영필*

Jung-Gon Kim, Won-Ho Shin, Hyun-Woo Hwang, Kyoung-Su Park, No-cheol Park, Hyungseok Yang, and Young-Pil Park

1. 서론

고용량 광 저장 시스템을 실현하기 위한 다양한 연구 중에 개구수 (NA)가 큰 SIL (Solid Immersion Lens)과 파장(λ)이 405nm 인 블루 레이저 다이오드를 기반으로 한 근접장 기록 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

SIL 기반 근접장 기록 (near-field recording: NFR) 서보 시스템에서는 디스크의 표면과 SIL 의 바닥 면 사이의 간극을 사용 파장의 4 분의 1 ($\lambda/4$) 보다 작게 유지할 수 있어야 한다. 이 간극은 근접장 영역이기 때문에 사용자 환경에서 흔히 발생 될 수 있는 외부적인 충격에 의해 디스크와 SIL 이 충돌이 쉽게 야기될 수 있고, 기본 제어기로는 NFR 시스템이 충격을 억압할 수 있는 제어 성능을 충분히 확보하고 있지 못하기 때문에 이 부분에 관한 연구가 필요하다.

외부 충격인가 시 기록 및 재생 동작 조건에서 제어 시스템의 성능을 향상시키기 위한 방법으로는 크게 두 가지가 있다. 첫 번째로는 해당 주파수 대역의 개루프 게인 (open-loop gain)을 증가시키는 것이고, 두 번째로는 제어시스템의 대역폭을 향상시키는 것이 있다. 그러나 개루프 게인을 증가시키는 것은 시스템의 특성으로 인해 설계에 있어서 한계가 있고, 대역폭을 향상시키는 것은 디스크의 스크래치나 고주파 공진, 전기적 노이즈 등에 시스템이 민감하게 반응하여 안정성을 저하시키는 원인이 될 수 있다.

Disturbance observer (DOB)는 일반적으로 제어 시스템의 개루프 전달함수에서 저주파 영역의 크기를 증가시켜 외란 감쇠 성능을 향상시킬 수 있고, dead-zone 제어기는 외부인가 충격이 시스템에 인가되었을 경우에만 작동하는 비선형 제어기로서 작동하는 동안에는 시스템의 대역폭을 일시적으로 향

상시키는 역할을 하게 된다.

본 논문에서는 SIL 기반 근접장 기록 (NFR) 시스템에서 외부충격에 대한 영향을 효과적으로 억압하기 위해 DOB 와 dead-zone 비선형 제어기를 사용하였다. 또한, DOB 에서 사용한 Q filter 의 대역폭을 비교하여 대충격 제어시스템의 성능을 검증하였다.

2. 본론

2.1 SIL 기반 근접장 서보 시스템

(1) 기본 간극 제어기 설계

플랜트는 voice coil motor (VCM) 타입 액츄에이터와 전류증폭기로 구성되어 있으며 플랜트의 동특성은 sine-sweep method 을 이용하여 얻었다. 플랜트의 동특성을 표 1 에 정리하였다. 그리고 플랜트를 바탕으로 한 NFR 시스템 기본 제어기의 개루프 전달함수는 교차 주파수, 이득여유, 위상여유, 루프 게인, 샘플링 주파수가 각각 7.62 kHz, 5.71 dB, 42.3°, > 90 dB, 100 KHz 가 되도록 설계하였다.

(2) NFR 시스템 간극 제어 알고리즘

SIL 기반 NFR 시스템은 빔의 초점을 SIL 바닥면에 위치시켜 전반사되고 이로 인하여 SIL 바닥면에는 evanescent 파가 근접장 영역만큼 발생한다. 따라서 NFR 서보 시스템은 SIL 이 미디어 사이의 거리로 인해 반사되는 광량의 차로 간극을 유지할 수 있게 설계된다. 대상 플랜트는 3 단계를 거쳐 초기 위치에서 목표 간극까지 접근한다. 처음에는 개루프 제어 모드를 사용하여 미리 정의한 근접장 영역까지 접근시키고, 이 과정을 어프로치 모드라고 정의한다. 그 후에 어프로치 모드에서 간극을 일정하게 유지하는 간극 제어 모드로 전환된다. 간극을 일정하게 유지할 때 외부 충격에 의해 최소 한계 간극으로 정의한

Tabled I. Dynamic characteristic of the designed plant

Parameter	Value
First resonance frequency (Hz)	50.05
Second resonance frequency(Hz)	20.94
Q factor (dB)	18.44
5Hz sensitivity ($\mu\text{m/V}$)	306.74
Gain of current amplify (A/V)	0.08

† 교신저자; 연세대학교 기계공학과

E-mail : pnch@yonsei.ac.kr

Tel : (02) 2133-4677, Fax : (02) 365-8460

* 연세대학교 기계공학과

** 연세대학교 정보저장기기 연구센터

5 nm 이하가 되면 디스크와 SIL의 충돌을 방지하기 위해 피드백 루프는 안전 모드로 전환된다.

3. NFR 시스템에 대한 충격 대응 제어기 설계

3.1 Disturbance observer (DOB) 설계

NFR 서보 시스템에서 SIL과 디스크 사이의 간극은 충격에 취약하기 때문에 제어기의 성능은 매우 중요하다. Lead-lag 보상기를 사용한 기본 제어기만으로는 모든 형태의 외부 충격에 충분히 대응할 수 없기 때문에 DOB을 추가하였다.

DOB는 구현하기 간편하기 때문에 정밀 제어에 널리 사용된다. 시스템은 binomial Q20 filter를 사용하였으며, Q filter 선형 전달 함수는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Q_{mn}(s) = \frac{\sum_{i=0}^n a_{mi}(\tau s)^i}{(\tau s + 1)^m} \quad (1)$$

여기서, τ 는 시간 변수이다. a_{mi} 는 binomial 계수이며 $m! / (m-i)!i!$ 로 구할 수 있다. m 는 분모 차수 ($m \geq n$)이고 n 는 분자의 차수이다.

시스템의 강화된 제어기 성능은 Q filter 대역폭에서만 발휘되기 때문에 최대한 시스템의 안정성을 확보하도록 Q filter의 대역폭을 설정해야 한다.

3.2 Dead-zone 비선형 제어기 설계

선형 피드백 제어기에서 Dead-zone을 사용한 서보 시스템은 충격에 대한 영향을 효과적으로 줄일 수 있다.

$$u(t) = \begin{cases} u_{base}(t) & |e(t)| \leq \delta, \\ u_{base}(t) + K(e(t) - \delta) & |e(t)| > \delta, \end{cases} \quad (2)$$

δ 와 K 는 dead-zone 제어기의 threshold과 슬로프 계인이며, $u_{base}(t)$ 와 $e(t)$ 는 Lead-lag 보상기인 기본 제어기에서 나오는 출력 값과 간극 오차 신호(GES)이다.

3.3 실험 결과

DOB와 기존 근접장 간극 제어기의 성능 검증을 위해 1 g@10 ms인 외부적인 충격을 시스템에 가하였으며, 충격에 가장 민감한 스피들 모터에서 외부 충격량을 측정하였다. 목표 간극과 디스크의 회전수, 그리고 축 방향의 디스크의 외란은 각각 30 nm, 300 rpm, $\pm 45 \mu\text{m}$ 이다.

NFR 서보 시스템에 DOB를 사용할 때 외부 충격으로 인한 디스크와 SIL의 충돌을 방지하는 것을 알 수 있었다. 대역폭 250 Hz와 500 Hz인 Q filter를 가진 DOB를 사용했을 때 최소 간극은 각각 13.46과 21.04 nm이며, Q filter의 대역폭을 증가할수록 충격에 의한 최소 간극이 증가한다.

DOB만 사용하면 외부 충격에 대응할 수 있는 성

TABLE II. Overall Experimental Results of Anti-shock Control for our SIL-based NFR Servo System

Parameter	Base air gap controller	Base air gap controller using DOB		Base air gap controller using DOB with dead-zone controller
External shock		1 g@10 ms		2.1 g@10 ms
Bandwidth of Q filter	None	250 Hz	500 Hz	500 Hz
Slope gain (K)	None	None	None	60
Minimum air-gap	Safety mode	13.46 nm	21.04 nm	19.48 nm
Rotating speed		300 rpm		
Target air-gap		30 nm		

능이 한계가 있기 때문에 제어기 성능을 보다 강화하기 위해 DOB와 dead-zone 비선형 제어기 모두 사용하였다. 외부 충격 시 최대 GES (gap error signal)가 ± 20 nm 이므로 dead-zone의 허용 한계 값을 ± 10 nm로 설정하였다. Dead-zone 비선형 제어기를 사용하고 DOB 적용 유무에 따라 개루프 전달 함수를 비교하면, 40-4000 Hz 주파수 영역에서 제어기 성능이 3dB 더 향상되었다. 또한, 충격 시 안정된 NFR 시스템을 위해 dead-zone의 최대 슬로프 계인(K)을 60으로 설정하였다. Dead-zone 비선형 제어기를 사용하여 외부 충격(2.1 g@10 ms)에 대해 최소 간극이 19.48 nm인 결과를 얻었다. 전체 실험결과는 표 2에 요약하였다.

4. 결론

본 논문에서 DOB와 dead-zone 비선형 제어기를 사용하여 외부적인 충격에 대한 NFR 서보 시스템의 외란 억압 성능이 향상됨을 확인할 수 있었다. 대역폭이 250 Hz와 500 Hz인 Q filter를 사용한 DOB를 적용하여 디스크의 회전 상태에서 외부적인 충격(1 g@10 ms)에 대해 간극 오차 신호를 각각 44.9%와 70.1%를 줄일 수 있다. 그리고 DOB와 dead-zone 비선형 제어기를 동시에 사용하여 1 g보다 큰 충격(2.1 g@10 ms)에 대해 최소 간극을 19.48 nm까지 높일 수 있었다. 그러므로 제안한 대충격 제어기는 외부 충격에 대해 신뢰할 수 있는 NFR 서보 시스템을 실현시킨다.

참고 문헌

- [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.