

안정적인 조동 검색을 위한 강인 트랙 추종 제어

A Robust Track-following Control for the Stable Coarse Seek

이 문 노*·진 경 복*

Moonnoh Lee and Kyoung Bog Jin

(2009년 12월 1일 접수 ; 2010년 1월 5일 심사완료)

Key Words : Coarse Seek(조동 검색), Tracking Gain-up Controller(트래킹 게인업 제어기), Robust H_∞ Control (강인 H_∞ 제어), Optical Disk Drive(광 디스크 드라이브)

ABSTRACT

In this paper, we provide a robust track-following controller design method for the stable coarse seek control. Due to the inaccurate velocity control during a coarse seek, the shake of fine actuator is generated and thus a gain-up track-following control is required to complete stably the coarse seek. To this end, a loop gain adjustment algorithm is introduced to estimate accurately the shake of fine actuator. A weighting function can be properly selected from a minimum tracking gain-up open-loop gain, calculated from the estimated shake quantity of fine actuator. A robust tracking gain-up controller is designed by considering a robust H_∞ control problem using the weighting function. The proposed design method is applied to the coarse seek control system of an optical rewritable drive and is evaluated through the experimental results.

1. 서 론

광 디스크의 데이터를 재생하거나 기록하기 위해서는 광 픽업이 트랙을 정밀하게 추종하게 하는 트랙 추종 제어와 광 픽업을 목표 트랙으로 최대한 빠르게 이동시키는 트랙 검색 제어가 안정적으로 구현되어야 한다. 보통 트랙 추종 제어와 검색 제어는 연속적으로 실행되기 때문에 각 제어시스템의 성능은 서로 영향을 주게 된다. 예를 들어 트랙 추종 제어시스템의 성능이 좋지 않으면 검색 제어시스템은 좀 더 정밀한 속도 제어가 필요하고 검색 제어시스템의 속도 제어가 정밀하지 못하면 좀 더 안정적인 트랙 추종 제어가 필요하다. 그러나 회전 배속이 증가함에 따라 검색 시간도 감소되어야 하

기 때문에 속도 제어의 성능도 한계가 있어 검색 제어 후 안정적으로 트랙 추종 제어를 시작할 수 없다. 그래서 안정적으로 검색 제어를 종료하고 트랙 추종을 시작하기 위해 gain-up 트랙 추종 제어를 일정시간 실행한 후에 정상적인 트랙 추종 제어로 변환하는 것이 필요하다.

트랙 검색 제어는 짧은 거리를 이동하는 미동 검색(fine seek)과 먼 거리를 이동하는 조동 검색(coarse seek)으로 구분된다. 조동 검색은 미동 검색보다 자주 실행되지 않지만 먼 거리를 빠르게 이동하기 위해 필요하며 이를 위해 빠른 속도 프로파일과 정확한 속도 제어가 필요하다. 광 픽업의 이동 속도가 빨라지면 더 정밀한 속도 제어가 필요하고 그렇지 않으면 미동 액추에이터에 잔존하는 속도가 더 증가하게 되어 정상적인 트랙 추종 제어를 위해 더 많은 안정화 시간이 필요하게 된다^(1,2).

Gain-up 트랙 추종 제어 시간을 최대한 줄이기 위해서는 미동 액추에이터의 흔들림을 최대한 빠르

† 교신저자; 정희원, 동의대학교 컴퓨터공학과
E-mail : mnlee@deu.ac.kr

Tel : (051)890-1713, Fax : (051)890-2629

* 정희원, 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부

게 제어해주어야 한다. 이를 위해 미동 액추에이터의 흔들림량을 최대한 정확하게 추정하여 흔들림이 존재하는 주파수 영역의 트랙킹 루프 게인을 적절히 증가시켜주어야 한다. 증가시켜준 트랙킹 루프 게인이 너무 작으면 gain-up 구간이 길어지게 되고 너무 크면 gain-up 트랙 추종 제어가 불안해져서 광 픽업이 다음 트랙으로 넘어가게 된다. 그래서 발생한 미동 액추에이터의 흔들림을 안정적으로 제어할 수 있는 적절한 트랙킹 gain-up 루프 보상을 해주어야 한다.

이 논문에서는 안정적인 조동 검색 제어를 완료하기 위해 속도 제어 후 발생하는 미동 액추에이터의 흔들림을 효율적으로 제어해주는 강인 트랙킹 gain-up 제어를 설계한다. 이를 위해 발생하는 액추에이터 흔들림량을 적절히 추정하는 알고리즘을 제안하고 이를 토대로 필요한 최소 트랙킹 gain-up 루프 게인을 계산한다. 그리고 가중 함수를 고려한 강인 H_∞ 제어기 설계 방법을 적용하여 안정적인 조동 검색 제어를 위한 트랙킹 gain-up 제어를 설계한다. 이 논문에서 제안한 설계 방법은 광 기록 기기의 조동 검색 제어시스템에 적용하였고 실험을 통해 타당성을 검증하였다

2. 조동 검색 제어와 액추에이터 흔들림

광 디스크 드라이브는 광 픽업을 트랙 방향으로 이동하기 위해 미동 액추에이터와 조동 액추에이터로 구성된 2단 구조의 트랙킹 액추에이터를 사용한다. 미동 액추에이터는 트랙을 정밀하게 추종하기 위해 이동 범위는 작지만 대역폭이 크게 설계되고 조동 액추에이터는 대역폭은 작지만 먼 거리를 이동할 수 있도록 설계된다. 트랙 추종 제어시스템은 두 액추에이터의 위치 제어를 통해 광 픽업이 트랙을 정밀하게 추종하도록 제어하는 반면에 검색 제어시스템은 두 액추에이터의 속도 제어를 통해 광 픽업을 목표 트랙으로 빠르고 안정적으로 이동시킨다. 대부분의 광 디스크 드라이브에서는 미동 액추에이터로 voice coil 모터를 사용하고 조동 액추에이터로 스텝핑 모터를 사용한다⁽¹⁾.

검색 제어시스템은 이동하는 거리에 따라 짧은 거리를 이동하는 미동 검색 제어시스템과 먼 거리를 이동하는 조동 검색 제어시스템으로 구분된다.

짧은 거리를 안정적으로 이동하기 위해 미동 검색 제어시스템은 미동 액추에이터를 속도 제어하는 반면에 먼 거리를 안정적으로 이동하기 위해 조동 검색 제어시스템은 속도 프로파일에 따라 스텝핑 모터를 속도 제어하고 미동 액추에이터는 스텝핑 모터의 이동으로 인한 광축 벗어남을 보정하는 제어 구조를 가지게 된다.

Fig. 1은 조동 검색 제어시스템의 구성도를 나타낸 것이다. 여기서 $P_c(s)$ 는 조동 액추에이터, $P_f(s)$ 는 미동 액추에이터, $V_c(s)$ 와 $V_f(s)$ 는 각 액추에이터의 드라이버를 나타낸다. 그리고 v_r , v_f , v_c , v_m , v_d 은 지령 속도, 미동 액추에이터의 속도, 조동 액추에이터의 속도, 실제 속도, 속도 외란을 나타낸다. 속도 프로파일 $vel(x_r)$ 은 스텝핑 모터의 구동 단위를 기초로 작성되는데 보통 half step 단위로 만들어진다.

조동 액추에이터인 스텝핑 모터는 속도 프로파일에 따라 움직이게 되면 2단 구조의 특성에 따라 미동 액추에이터도 힘을 받아 흔들리게 된다. 조동 액추에이터와 미동 액추에이터의 광축이 일치하면 디스크에 맺히는 상이 최대가 되어 트랙킹 에러 신호의 크기가 최대가 되지만 조동 액추에이터와 미동 액추에이터의 광축이 서로 벗어나면 생성되는 트랙킹 에러 신호의 크기가 작아져 정상적인 트랙 추종 제어를 실행할 수 없다. 그래서 조동 검색 후의 안정적인 트랙 추종 제어를 위해서는 검색 제어 동안 조동 액추에이터의 움직임에 따른 광축 벗어남의 정도를 측정하여 미동 액추에이터를 움직여서 항상 광축이 일치하도록 해주어야 한다. x_{ce} 은 광축 벗어남의 정도를 나타내며 광 픽업에서 출력되는 센서 신호를 이용하여 생성된다. $C_{ce}(s)$ 는 광축 벗어남을 효율적으로 제어하기 위해 적용되는 제어기이다.

트랙 추종 제어시스템은 디스크 편심으로 인해 발생하는 트랙킹 외란을 효율적으로 제어하여 광 픽업이 항상 트랙을 추종하도록 설계된다. 디스크의

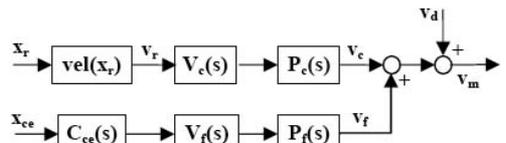


Fig. 1 Block diagram of coarse seek control system

회전 속도가 증가함에 따라 트랙킹 외란에 존재하는 고주파 성분이 증가하게 되고 트랙킹 제어 대역도 증가하게 된다. 보통, 트랙 추종 제어시스템은 트랙킹 외란을 효율적으로 제어하기 위해 배속에 따라 약 2~5 kHz 대역을 가지도록 설계된다. 조동 검색 제어 후 미동 액추에이터는 잔존 속도에 비례하는 흔들림이 미동 액추에이터에 발생한다. 미동 액추에이터 흔들림에 의해 발생하는 외란 성분은 정상적인 트랙 추종 제어 대역보다 높은 주파수 성분을 가지기 때문에 검색 제어 후 바로 정상적인 트랙 추종 제어를 시작할 수 없게 된다. 그래서 일정 시간 동안 미동 액추에이터 흔들림을 최대한 빠르게 제어하는 gain-up 추종 제어가 필요하다. Gain-up 트랙 추종 제어는 미동 액추에이터 흔들림이 발생하는 주파수 영역에 대한 트랙킹 루프 게인을 정상적인 트랙킹 루프 게인보다 증가시켜 주어 액추에이터 흔들림이 최대한 빨리 제어되도록 해준다. Gain-up 트랙 추종 제어가 효율적으로 구현되어야 정상적인 트랙 추종 제어로 변환될 수 있고 조동 검색 제어는 안정적으로 종료되게 된다.

이 논문에서는 조동 검색 후 발생하는 미동 액추에이터의 흔들림을 효율적으로 제어하기 위해 강인 트랙킹 gain-up 제어기를 설계하는 문제를 다룬다. 적절한 gain-up 트랙 추종 제어를 위해서는 발생하는 액추에이터 흔들림량에 비례하여 트랙 루프 게인을 증가시켜주는 것이 필요하다. 그래서 이 논문에서는 조동 검색 후 미동 액추에이터의 흔들림량을 최대한 정확하게 추정하는 알고리즘을 제안하고 이를 토대로 가중 함수를 고려한 H_∞ 제어기 설계 방법을 강인 트랙킹 gain-up 제어기를 설계하기 위해 적용한다.

3. 트랙킹 gain-up 제어기의 설계

트랙 추종 제어는 데이터를 재생하거나 기록하기 위해 필요한 정상적인 트랙 추종 제어와 검색 제어 후 미동 액추에이터 흔들림을 빠르게 안정시키기 위해 적용되는 gain-up 트랙 추종 제어로 구분될 수 있다. Fig. 2는 트랙 추종 제어시스템의 구성도를 나타낸 것이다.

액추에이터 흔들림이 없는 정상적인 트랙 추종 제어시스템은 증폭 게인 K_p , 미동 액추에이터 $P_f(s)$, 트

랙킹 제어기 $C_f(s)$ 로 구성된다. 트랙킹 에러 $e(t)$ 는 광 소자에 의해 검출된 후 게인 K_p 에 의해 증폭된다. 트랙 추종 제어시스템은 디스크 편심으로 인해 발생하는 트랙킹 외란 $d(t)$ 에 대해 광 픽업이 항상 트랙을 정밀하게 추종하도록 트랙킹 제어기 $C_f(s)$ 는 설계되어야 한다.

조동 검색 후 발생하는 미동 액추에이터의 흔들림은 트랙 추종 제어시스템에서 외란 $d_a(t)$ 로 나타나게 된다. Fig. 2에서 $d_a(t)=0$ 인 정상적인 트랙 추종 제어에서는 정상적인 트랙킹 제어기 $C_f(s)$ 가 연결되는 반면에 $d_a(t) \neq 0$ 인 조동 검색 후에는 트랙킹 gain-up 제어기 $C_u(s)$ 가 트랙 추종 제어시스템에 연결된다. Gain-up 트랙 추종 제어는 액추에이터 흔들림이 안정화되어 트랙킹 에러가 목표치 이하로 작아지면 정상적인 트랙 추종 제어로 전환된다.

미동 액추에이터의 동작 특성은 보통 2차 선형시스템으로 모델링될 수 있고 액추에이터 파라미터는 공칭값에서 약 10% 범위내에서 변하기 때문에 미동 액추에이터는 계수 파라미터에 불확실성을 포함하는 다음과 같이 나타낼 수 있다^(1,2,6).

$$P_f(s) = \frac{[b_2^-, b_2^+]}{s^2 + [a_1^-, a_1^+]s + [a_2^-, a_2^+]} \quad (1)$$

$$[b_2^-, b_2^+] = b_{2n} + \delta b_2, [a_1^-, a_1^+] = a_{1n} + \delta a_1, i = 1, 2$$

$$|\delta b_2| \leq m_{b_2}, |\delta a_1| \leq m_{a_1}, |\delta a_2| \leq m_{a_2}$$

여기서 b_{2n}, a_{1n}, a_{2n} 는 액추에이터 파라미터의 공칭값이고 $m_{b_2}, m_{a_1}, m_{a_2}$ 는 모델링 불확실성 $\delta b_2, \delta a_1, \delta a_2$ 의 최대값이다. 디스크 편심에 의해 트랙 추종 제어시스템에 발생하는 트랙킹 외란 $D(j\omega)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D(j\omega) = E_d(j\omega) + P_f(j\omega)U_d(j\omega) \quad (2)$$

$e_d(t)$ 와 $u_d(t)$ 는 정상적인 트랙 추종 제어에서의

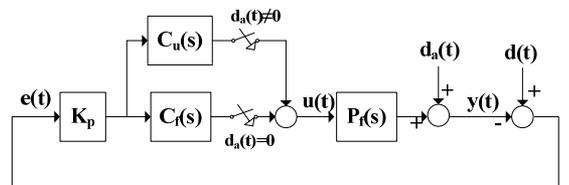


Fig. 2 Block diagram of track-following system

트래킹 에러와 제어기 입력을 나타낸다. 미동 액추에이터 모델 $P_f(j\omega)$ 는 모델링 불확실성을 포함하고 있기 때문에 트래킹 외란 식 (2)를 직접적으로 계산할 수 없다. 그래서 $P_f(j\omega)$ 대신 액추에이터 공칭 모델 $P_{fn}(j\omega)$ 을 사용하여 트래킹 외란을 추정한다. 식 (2)에 공칭 모델을 사용하면 액추에이터 불확실성이 미치는 영향만큼 트래킹 외란을 정확하게 추정할 수 없게 된다. 트래킹 외란을 최대한 정확하게 추정하기 위해서는 액추에이터 불확실성의 영향을 추정하여 이를 보상 게인 K_c 를 통해 식 (2)에 반영하는 것이 필요하다. 공칭 모델과 보상 게인을 적용하면 트래킹 외란은 다음과 같이 추정될 수 있다.

$$\hat{D}(j\omega) = E_d(j\omega) + K_c P_{fn}(j\omega) U_d(j\omega) \quad (3)$$

트래킹 외란 추정에서 미동 액추에이터의 불확실성에 대한 영향을 최대한 고려하기 위해 루프 게인 조정 알고리즘을 사용할 수 있다. 루프 게인 조정 알고리즘은 액추에이터 불확실성에 대해서도 트랙 추종 제어시스템의 위상 여유를 항상 일정한 범위내에서 유지하기 위해 미동 액추에이터 불확실성의 정도에 따라 역으로 트래킹 제어기 $C_f(s)$ 의 게인을 자동으로 조정해준다. 이러한 트래킹 루프 게인 조정 결과에 따라 보정 상수 K_c 는 결정될 수 있다⁽¹⁻³⁾.

이 논문에서는 조동 검색 후 액추에이터 잔존 속도에 의해 발생하는 액추에이터 흔들림량 $d_a(t)$ 를 추정한다. 이를 위해 조동 검색 후 gain-up 트랙 추종 제어에 정상적인 트래킹 제어기 $C_f(s)$ 를 연결한다. 그러면 gain-up 트랙 추종 제어에서 액추에이터 흔들림량 $d_a(t)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D_a(j\omega) = D(j\omega) - E_a(j\omega) - P_f(j\omega) U_a(j\omega) \quad (4)$$

$e_a(t)$ 와 $u_a(t)$ 는 gain-up 트랙 추종 제어에서의 트래킹 에러와 제어기 입력을 나타낸다. 트래킹 외란 $d(t)$ 는 트랙 추종 제어에서 항상 일정하게 존재하기 때문에 추정된 트래킹 외란 식 (3)과 $K_c P_{fn}(j\omega)$ 를 식 (4)에 적용하면 액추에이터 흔들림량은 다음과 같이 추정될 수 있다.

$$\hat{D}_a(j\omega) = \hat{D}(j\omega) - E_a(j\omega) - K_c P_{fn}(j\omega) U_a(j\omega) \quad (5)$$

트래킹 외란은 디스크 회전 주파수의 정수배에서 상대적으로 큰 성분이 존재하는 반면에 조동 검색 후 액추에이터 흔들림은 조동 검색시의 속도 제어의 영향으로 수 kHz의 고주파 성분이 상대적으로 크게 존재한다. 추정된 트래킹 외란과 액추에이터 흔들림량을 이용하여 gain-up 트랙 추종 제어에서 트래킹 에러가 최대 허용 에러 e_{max} 보다 작도록 하기 위한 최소 트래킹 gain-up 루프 게인 $L_{umin}(j\omega)$ 를 구하면 다음과 같다.

$$L_u(j\omega) \geq L_{umin}(j\omega) = \frac{\hat{D}(j\omega) - \hat{D}_a(j\omega)}{e_{max}} \quad (6)$$

조동 검색 후 일정 시간 동안 트래킹 루프 게인이 식 (6)보다 크게 설정되어야 트래킹 에러가 최대한 빠르게 안정되고 트래킹 에러는 e_{max} 보다 작게 유지될 수 있다. 트래킹 gain-up 제어기를 포함하지 않은 gain-up 트랙 추종 제어시스템은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + H_1 p(t) + B_2 u(t) \\ e(t) &= C_2 x(t) + H_2 p(t) + d(t) - d_a(t) \\ q(t) &= E_1 x(t), p(t) = \Delta q(t), \|\Delta\| \leq 1 \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 $x(t)$, $p(t)$, $d(t)$, $d_a(t)$ 는 상태 변수, 미동 액추에이터 불확실성 입력, 편심에 의한 트래킹 외란, 액추에이터 흔들림에 의한 외란 입력을 각각 나타낸다. 미동 액추에이터의 모델링 불확실성은 H_1 , H_2 , E_1 행렬에 포함될 수 있다. 그리고 트래킹 gain-up 제어기 $C_u(s)$ 는 증폭 게인 K_p 을 포함하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_u(t) &= A_u x_u(t) + B_u (K_p e(t)) \\ u(t) &= C_u x_u(t) \end{aligned} \quad (8)$$

조동 검색 후 발생하는 액추에이터 흔들림에 대해 트래킹 에러가 최대 허용 에러 e_{max} 보다 작게 유지하기 위해서는 트래킹 루프 게인이 일정 시간 동안 최소 트래킹 gain-up 루프 게인 $L_{umin}(j\omega)$ 보다 커야 한다. 이러한 특성을 고려하여 $z(s) = W(s)E(s)$ 의 관계를 만족하는 가중 함수 $W(s)$ 를 트래킹 gain-up 제어기 설계 과정에 도입한다. 가중 함수는 최소 트래킹 gain-up 루프 게인 식 (6)보다 게인이

조금 더 크도록 적절히 선택한다. 트랙킹 gain-up 제어기 식 (8)과 가중 함수를 식 (7)에 적용하면 가중 함수를 포함한 gain-up 트랙 추종 제어시스템을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\bar{x}}(t) &= \bar{A}\bar{x}(t) + \bar{H}_1 p(t) + \bar{B}_1(d(t) - d_a(t)) \\ z(t) &= \bar{C}_w \bar{x}(t) \\ q(t) &= \bar{E}_1 \bar{x}(t), \quad p(t) = \Delta q(t), \quad \|\Delta\| \leq 1 \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \bar{A} &= \begin{bmatrix} A & 0 & B_2 C_u \\ B_w C_2 & A_w & 0 \\ K_p B_u C_2 & 0 & A_u \end{bmatrix}, \quad \bar{H}_1 = \begin{bmatrix} H_1 \\ B_w H_2 \\ K_p B_u H_2 \end{bmatrix}, \\ \bar{B}_1 &= \begin{bmatrix} 0 \\ B_w \\ K_p B_u \end{bmatrix}, \quad \bar{C}_w = [0 \quad C_w \quad 0], \quad \bar{E}_1 = [E_1 \quad 0 \quad 0] \end{aligned} \quad (10)$$

이 논문에서는 조동 검색 후 미동 액추에이터 흔들림을 효율적으로 제어하기 위해 gain-up 트랙 추종 제어시스템이 강인 안정하고 $\|T_{(d-da)z}(j\omega)\|_\infty < 1$ 을 만족하는 트랙킹 gain-up 제어기 $C_u(s)$ 를 설계하는 문제를 다룬다. 만약 설계된 트랙킹 gain-up 제어기가 $\|T_{(d-da)z}(j\omega)\|_\infty < 1$ 를 만족한다면 트랙킹 에러는 최대 허용 에러 e_{max} 보다 작게 유지될 수 있고 정상적인 트랙 추종 제어로 전환될 수 있기 때문에 안정적으로 조동 검색 제어를 종료하게 된다. 가중 함수를 포함한 gain-up 트랙 추종 제어시스템에 대해 다음을 만족하는 Lyapunov 함수 $V(\bar{x}) = \bar{x}^T P \bar{x}, P > 0$, 를 정의한다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} V(\bar{x}) + z^T(t) z(t) \\ - (d(t) - d_a(t))^T (d(t) - d_a(t)) < 0 \end{aligned} \quad (11)$$

트랙킹 gain-up 제어기가 액추에이터 불확실성, 트랙킹 외란, 액추에이터 흔들림 외란에 대해 식 (11)을 만족한다면 gain-up 트랙 추종 제어시스템은 강인 안정하고 $\|T_{(d-da)z}(j\omega)\|_\infty < 1$ 을 만족하게 된다. 최종적으로 gain-up 트랙 추종 제어시스템이 강인 안정하고 $\|T_{(d-da)z}(j\omega)\|_\infty < 1$ 을 만족하는 트랙킹 gain-up 제어기는 다음의 식을 만족하는 행렬 $A_u, B_u, C_u, X > 0$ 와 상수 $\lambda > 0$ 을 구하는 문제로 변환될 수 있다⁽⁶⁾.

$$\begin{bmatrix} \bar{A}X + X\bar{A}^T & \bar{B}_1 & \bar{H}_1 & X\bar{C}_w^T & \lambda X\bar{E}_1^T \\ \bar{B}_1^T & -I & 0 & 0 & 0 \\ \bar{H}_1^T & 0 & -\lambda I & 0 & 0 \\ \bar{C}_w X & 0 & 0 & -I & 0 \\ \lambda \bar{E}_1 X & 0 & 0 & 0 & -\lambda I \end{bmatrix} < 0 \quad (12)$$

식 (12)의 부등식 행렬은 비선형 항목을 포함하고 있기 때문에 행렬 X 를 분할하고 제어기 행렬을 치환함으로써 비선형 항목은 선형화될 수 있고 식 (12)는 선형 부등식 행렬(LMI)로 변환될 수 있다^(6,7). 설계된 트랙킹 gain-up 제어기는 조동 검색 후 미동 액추에이터 흔들림에 대해 gain-up 트랙 추종 제어시스템이 강인 안정하고 $\|T_{(d-da)z}(j\omega)\|_\infty < 1$ 를 만족하기 때문에 $W(j\omega) > L_{umin}(j\omega)$, 식 (6)으로부터 트랙킹 에러가 최대 허용 에러 e_{max} 보다 작게 유지될 수 있다는 것을 다음을 통해 보일 수 있다.

$$\begin{aligned} |E(j\omega)| &= \frac{|T_{(d-da)z}(j\omega)| |D(j\omega) - D_a(j\omega)|}{|W(j\omega)|} \\ &< \frac{|\hat{D}(j\omega) - \hat{D}_a(j\omega)|}{L_{umin}(j\omega)} = e_{emx} \end{aligned} \quad (13)$$

4. 실험 결과

제안한 트랙킹 gain-up 제어기 설계 방법의 타당성을 검증하기 위해 광 기록기기의 조동 검색 제어 시스템에 적용하였다. 이 논문에서는 검색 시간이 매우 짧은 CD 48배속의 1000 트랙 조동 검색 후 미동 액추에이터의 흔들림을 빠르게 제어하기 위해 트랙킹 gain-up 제어기를 설계하였다. 실험에서 사용된 광 기록기기의 미동 액추에이터는 공진 주파수 58 Hz, 감쇠 상수 0.089, DC 감도 1.55 mm/V이고 전압-전류 드라이버 게인이 6이므로 미동 액추에이터 공칭 모델은 다음과 같이 모델링 될 수 있다.

$$P_{fn}(s) = \frac{1235}{s^2 + 64.85s + 132800} \left[\frac{M}{V} \right] \quad (14)$$

미동 액추에이터 파라미터들은 공칭값에서 약 10% 범위내에서 변하기 때문에 모델링 불확실성의 최대값을 $m_{b2} = 61.75, m_{a1} = 3.24, m_{a2} = 6640$ 로 설

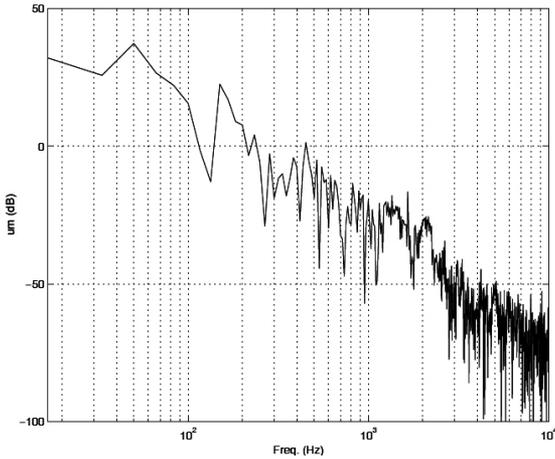


Fig. 3 The estimated shake quantity of the fine actuator after a coarse seek moving 1000 tracks

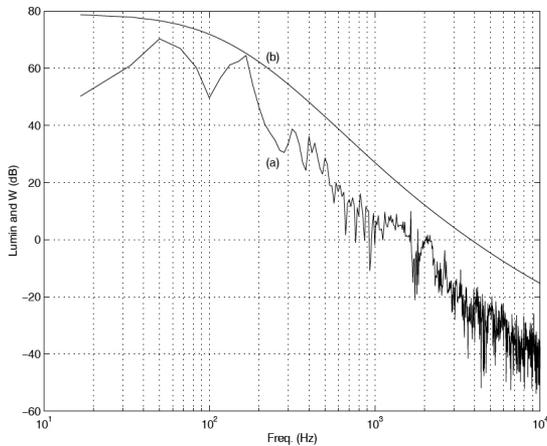


Fig. 4 A minimum tracking gain-up open-loop gain of CD 48X (a) and the Bode plot of weighting function (b)

정하였다. 광 기록기에서 CD 디스크의 0.8 mm에 대해 트래킹 에러가 1.1 V로 변환되므로 증폭 계인 K_p 는 1.38×10^6 [V/M]의 값을 가진다. 트래킹 루프 게인 조정 알고리즘을 적용한 결과 트래킹 제어기의 DC 게인은 초기 게인의 1/1.05배로 감소하였다. 이것은 트래킹 액추에이터의 실제 게인이 식 (14)의 공칭 게인보다 1.05배 더 크다는 것을 나타내므로 보상 게인 K_c 를 1.05로 설정하였다.

Fig. 3은 식 (4)를 적용하여 CD 48 배속에서 조동 검색 후 미동 액추에이터 흔들림량을 추정할 결

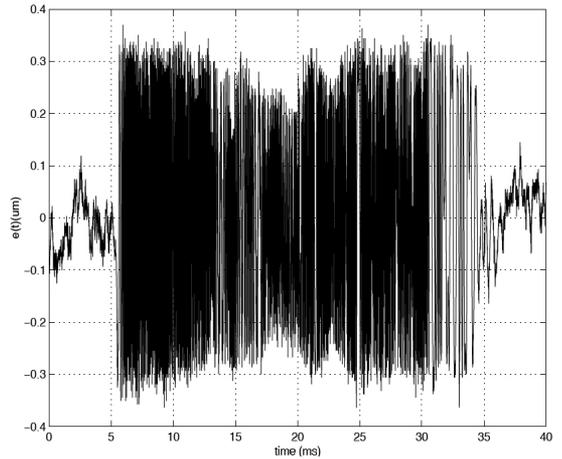


Fig. 5 The tracking error after applying the tracking normal controller $C_f(s)$

과이다. 미동 액추에이터 흔들림의 추정에서는 정상적인 트랙 추종 제어를 위해 설계된 트래킹 제어기 $C_f(s)$ 를 사용하였다.

$$\frac{5.3 \times 10^6 s^3 + 2.0 \times 10^{10} s^2 + 2.1 \times 10^{14} s + 3.1 \times 10^{17}}{s^4 + 5.7 \times 10^5 s^3 + 5.5 \times 10^{10} s^2 + 5.2 \times 10^{14} s + 3.7 \times 10^{17}} \quad (15)$$

조동 검색 후 액추에이터 흔들림은 조동 검색시의 속도 제어에 따라 달라지며 수백 Hz에서 수 kHz의 고주파 성분이 상대적으로 많이 포함되어 있다. 조동 검색 후 액추에이터 흔들림을 안정적으로 제어하기 위해 필요한 최소 트래킹 gain-up 루프 게인 $L_{umin}(j\omega)$ 는 추정된 액추에이터 흔들림량과 트래킹 에러의 최대 허용 에러를 이용하여 식 (6)과 같이 구할 수 있다. Fig. 4(a)는 최대 허용 에러가 0.05 μm 인 CD 48 배속에서의 최소 트래킹 gain-up 루프 게인을 나타낸다. 가중 함수 $W(s)$ 는 Fig. 4(a)의 최소 트래킹 gain-up 루프 게인보다 조금 더 큰 게인을 가지도록 설정하였다.

$$W(s) = \frac{7.0 \times 10^3 s^2 + 5.8 \times 10^8 s + 4.7 \times 10^{12}}{s^3 + 2.7 \times 10^3 s^2 + 2.2 \times 10^6 s + 5.4 \times 10^8} \quad (16)$$

공칭 모델 식 (14)와 가중 함수 식 (16)에 대해 식 (12)를 만족하는 강인 트래킹 gain-up 제어를 설계하면 다음과 같다.

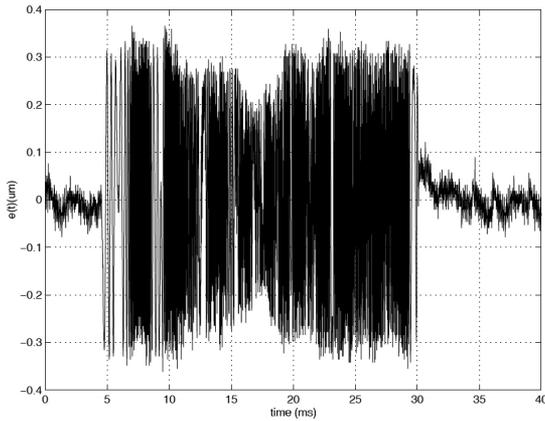


Fig. 6 The tracking error after applying the tracking gain-up controller $C_u(s)$

$$\frac{1.8 \times 10^6 s^3 + 6.7 \times 10^{10} s^2 + 6.9 \times 10^{14} s + 9.5 \times 10^{17}}{s^4 + 5.2 \times 10^5 s^3 + 4.7 \times 10^{10} s^2 + 4.5 \times 10^{14} s + 2.9 \times 10^{17}} \quad (17)$$

Fig. 5는 1000 트랙 조동 검색 후 정상적인 트래킹 제어기를 적용했을 때의 트래킹 에러를 나타낸다. 조동 검색 제어는 6ms에서 31ms 까지 약 25ms 동안 이루어졌고 31ms에서 정상적인 트랙 추종 제어가 시작되었다. 그러나 액추에이터 흔들림을 적절히 제어해주지 못해 35ms까지는 트랙 추종 제어를 정상적으로 실행하지 못해 광 픽업이 목표 트랙에서 몇 트랙을 벗어나는 것을 볼 수 있다. 이런 경우 목표 트랙으로 이동하기 위한 짧은 트랙 검색을 다시 실행하여야 하므로 검색 시간이 더 길어지게 된다. Fig. 6은 1000 트랙 조동 검색 후 설계한 트래킹 gain-up 제어기를 적용했을 때의 트래킹 에러를 나타낸다. 조동 검색 제어는 5ms에서 30ms까지 약 25ms 동안 이루어졌고 30ms에서 트래킹 gain-up 추종 제어가 시작되었다. Fig. 5와 달리 트래킹 gain-up 추종 제어에서는 조동 검색 후 액추에이터 흔들림에 대해 목표 트랙을 정상적으로 추종하고 있는 것을 알 수 있다. 이 논문의 실험 결과는 고배속 CD 48배속의 실험 결과이므로 다른 고배속 광 기록기에도 적용할 수 있다.

5. 결 론

이 논문에서는 조동 검색 후 발생하는 미동 액추

에이터의 흔들림을 안정적으로 제어하기 위해 강인 트래킹 gain-up 제어기를 설계하는 방법을 제안하였다. 이를 위해 발생하는 미동 액추에이터의 흔들림량을 최대한 정확하게 추정하는 알고리즘을 제안하였고 이를 토대로 가중 함수를 고려한 강인 H_∞ 제어기 설계를 적용하여 강인 트래킹 gain-up 제어기를 설계하였다. 제안한 제어기 설계 방법을 광 기록기기의 조동 검색 제어시스템에 적용하였고 실험을 통해 타당성을 검증하였다.

후 기

이 논문은 2009학년도 동의대학교 교내연구비에 의해 연구되었음(과제번호 2009AA178).

참 고 문 헌

- (1) Jin, K. B., Doh, T.-Y., Ryoo, J. R. and M. J. Chung, 1998, "Robust Direct Seek Control for High-speed Rotational Optical Disk Drives," IEEE Transactions on Consumer Electronics, pp. 1273~1283.
- (2) Jin, K. B., Lee, H. K. and Chung, M. J., 1998, "Direct Seek Control Scheme for High-speed Rotational Optical Disk Drives," Electronics letters, pp. 1476~1477.
- (3) Suzuki, M., Tanaka, H. and Miura, Y., 1990, "Pull-in Condition and Method of Tracking Servo in Optical Disk Drive," J. Inst. Television Jpn, Vol. 44, No. 10, pp. 1391~1397.
- (4) Suzuki, M., Tanaka, H., Miura, M., Suzuki, Y. and Mori, M., 1993, "Advanced Direct Seeking System for 5.25" Magneto-optical Disk Drive," J. Appl. Phys., Vol. 32, Part 1, No. 11B, pp. 5371~5375.
- (5) Jin, K. B. and Lee, M.-N., 2003, "Vibration Control Technology of an Optical Disk Drive," Journal of KSNVE, Vol. 13, No. 1, pp. 48~55.
- (6) Lee, M.-N., Jin, K. B. and Yoon, K. B., 2007, "Design of a Robust Tracking Controller by the Estimation of Vibration Quantity," Journal of Control, Automat., and Contr. Eng., Vol. 13, No. 9, pp. 856~860.

(7) Chilali, M. and Gahinet, P., “ H^∞ Design with Pole Placement Constraints: An LMI Approach,” IEEE Trans. Automat. Contr., Vol. 41, No. 3, pp. 358~367.

(8) Boyd, S., El Ghaoui, L., Feron, E. and Balakrishnan, V., Linear Matrix Inequalities in Systems and Control Theory, Philadelphia, PA:

SIAM, 1994.

(9) Zhou, K., Doyle, J. C. and Glover, K., 1989, Robust and Optimal Control, Prentice-Hall, Inc.

(10) Gahinet, P., Nemirovski, A., Laub, A. and Chilali, M., 1995, The LMI Control Toolbox, Natick, MA: The MathWorks.