

액추에이터 흔들림 제어를 위한 트래킹 Gain-Up 제어기 설계

A Tracking Gain-Up Controller Design for Controlling the Shake of Actuator

진 경 복, 이 문 노*

(Kyoung Bog Jin and Moonnoh Lee)

Abstract: In this paper, we deal with a tracking gain-up controller design problem to control effectively the shake of tracking actuator after a track seek. A minimum tracking gain-up open-loop gain can be calculated by estimating the shake of tracking actuator and a desired transient specification is considered to diminish effectively the shake of actuator. A tracking gain-up controller is designed by considering a robust H_∞ control problem with a regional stability constraint. The proposed tracking gain-up controller design method is applied to the track-following system of a DVD recording device and is evaluated through the experimental results.

Keywords: gain-up track-following control, shake of tracking actuator, regional stability constraint, weighting function, LMI (Linear Matrix Inequality)

I. 서론

광 기록기기는 디스크에 데이터를 기록하거나 디스크에 기록된 데이터를 재생하기 위해 트랙 추종 제어와 트랙 검색 제어를 반복하여야 한다. 트랙 추종 제어는 디스크의 편심적인 회전에 의해 발생하는 트래킹 외란에 대해 광 픽업이 안정적으로 트랙을 추종하게 한다. 트랙 검색 제어는 광 픽업을 빠르게 데이터가 있는 목표 트랙으로 이동시키기 위해 필요하며 속도 제어의 정밀도에 따라 검색 제어가 끝난 후 트랙킹 액추에이터에 잔존하는 속도가 달라진다. 검색 제어 후 잔존 속도가 작은 경우에는 액추에이터 흔들림이 작아 정상적인 트랙 추종 제어가 가능하지만 잔존 속도가 큰 경우에는 액추에이터 흔들림에 의한 고주파 외란 성분이 증가하기 때문에 정상적인 트래킹 제어기로는 안정적인 트랙 추종 제어를 시작할 수 없게 된다[1-2,4].

이와 같이 검색 제어 후 액추에이터 잔존 속도에 의해 액추에이터 흔들림이 발생하게 되고 이로 인해 증가된 고주파 외란 성분을 효율적으로 제어하기 위해서는 일정시간 동안 고주파 대역의 트래킹 루프 게인을 증가시켜 주어야 한다. 액추에이터 잔존 속도에 의한 액추에이터 흔들림을 빠르게 안정화시키지 못하면 광 픽업이 트랙을 안정적으로 추종할 수 없게 되어 목표 트랙을 벗어나게 된다. 그래서 액추에이터 흔들림을 최대한 빨리 제어하기 위해 일정시간 동안 gain-up 트랙 추종 제어가 필요하다. 대부분의 광 기록기기 제조 회사에서는 반복적인 제어기 설계와 실험을 통해 고주파 대역의 트래킹 루프 게인을 조금씩 증가시켜 액추에이터 흔들림을 최대한 빠르게 안정화시키는 최적의 트래킹 gain-up 제어기를 설계하고 있다[4].

본 논문에서는 트랙 검색 제어 후 잔존 속도에 의한 액추에이터 흔들림의 영향을 최소화하는 트래킹 gain-up 제어기를 설계한다. 이를 위해 액추에이터 흔들림량을 최대한 정확

하게 추정하고 검색 제어 후 액추에이터 흔들림을 최대한 빠르게 감소시키기 위해 과도 응답 특성을 트래킹 gain-up 제어기 설계에서 고려한다. 결론적으로 트래킹 gain-up 제어기는 지역 안정 제한 조건을 가진 강인 H_∞ 제어 문제를 고려함으로써 설계될 수 있다. 본 논문에서 제안한 트래킹 gain-up 제어기 설계 방법은 DVD 기록기기의 gain-up 트랙 추종 시스템에 적용하였고 실험을 통해 타당함을 나타내었다.

II. 액추에이터 흔들림량 추정

그림 1은 광 기록기기의 트랙 추종 시스템의 블록도를 나타낸다. 트랙 추종 제어는 데이터를 재생하거나 기록하기 위해 필요한 정상적인 트랙 추종 제어와 검색 동작 후나 외부 충격에 의한 액추에이터 흔들림을 빠르게 안정시키기 위해 필요한 gain-up 트랙 추종 제어로 구분된다. 액추에이터 흔들림이 없는 정상적인 트랙 추종 시스템은 증폭 게인 K_p , 트래킹 액추에이터 $P(s)$, 트래킹 제어기 $C_f(s)$ 로 구성된다. 트래킹 에러 $e(t)$ 는 트랙 중심과 빔 스팟 사이의 차이를 나타내며 광 소자에 의해 검출된 후 게인 K_p 에 의해 증폭된다. 트랙 추종 시스템에는 디스크 편심으로 인해 디스크가 회전하면 트래킹 외란 $d(t)$ 이 발생하기 때문에 트래킹 외란이 존재하더라도 광 픽업이 항상 트랙을 정밀하게 추종하도록 트래킹 제어기 $C_f(s)$ 는 설계되어야 한다.

광 픽업의 목표 트랙을 변경하여야 하는 경우 트랙 검색 제어를 통해 광 픽업을 빠르게 이동시켜야 하고 검색 제어 후 안정적으로 트랙 추종 제어를 다시 시작하여야 한다. 검색 제어 후 트래킹 액추에이터에는 속도 제어의 정밀도에 따

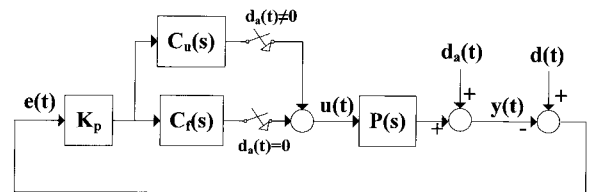


그림 1. 트랙 추종 시스템의 블록도.

Fig. 1. Block diagram of the track-following system.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2009. 2. 18., 수정: 2009. 4. 27., 채택확정: 2009. 7. 25.

진경복: 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부(kbjin@kut.ac.kr)

이문노: 동의대학교 컴퓨터공학과(mnlee@deu.ac.kr)

※ 본 연구는 지식경제부의 지역혁신사업(RIC)의 지원으로 수행되었음.

라 잔존 속도가 존재하며 이로 인해 액추에이터 흔들림이 존재한다. 액추에이터 흔들림은 검색 제어 후 트랙 추종 제어에서 외란 $d_d(t)$ 로 트랙 추종 시스템에 나타나게 된다. 그림 1에서 $C_f(s)$ 는 정상적인 트랙킹 제어기이고 $C_u(s)$ 는 액추에이터 흔들림이 존재할 때 구동되는 트랙킹 gain-up 제어기이다. 즉, $d_d(t)=0$ 인 정상적인 트랙킹 제어에서는 $C_f(s)$ 가 트랙킹 루프에 연결되고 $d_d(t) \neq 0$ 인 액추에이터 흔들림이 존재할 때에는 $C_u(s)$ 가 트랙킹 루프에 연결된다. 액추에이터 흔들림의 발생 여부는 트랙킹 에러의 고주파 성분만을 추출하여 일정 레벨 인지를 판단하는 외부 회로에 의해 판단될 수 있다. 검색 제어 후 잔존 속도에 의한 액추에이터 흔들림을 효율적으로 제어하기 위해 검색 제어 후 일정기간 동안 트랙킹 gain-up 제어를 구동하고 트랙킹 에러가 목표치 이하로 작아지면 정상적인 트랙킹 제어 모드로 전환한다.

대부분의 트랙킹 액추에이터는 voice 코일 모터를 사용하며 액추에이터 파라미터는 공칭값에서 10% 범위내에서 변하게 된다. 그래서 트랙킹 액추에이터는 불확실성을 갖는 2차 선형 시스템으로 모델링될 수 있고 모델링 불확실성은 계수 파라미터로 나타낼 수 있다[1].

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

$$[b_2^-, b_2^+] = b_{2n} + \delta b_2, |\delta b_2| \leq m_{b2}$$

$$[a_1^-, a_1^+] = a_{1n} + \delta a_1, |\delta a_1| \leq m_{a1}$$

$$[a_2^-, a_2^+] = a_{2n} + \delta a_2, |\delta a_2| \leq m_{a2}$$
(1)

여기서 a_{1n} , a_{2n} , b_{2n} 는 액추에이터 파라미터의 공칭값이고 m_{a1} , m_{a2} , m_{b2} 는 모델링 불확실성 δa_1 , δa_2 , δb_2 의 최대값이다. 정상적인 트랙 추종 제어에서 트랙킹 에러는 외란 $d(t)$ 에 대해 항상 최대 허용 에러 e_{max} 보다 작아야 한다. 이를 위해 트랙킹 제어기 $C_f(s)$ 는 트랙킹 외란 $d(t)$ 와 최대 허용 에러로부터 구한 최소 트랙킹 루프 게인보다 트랙킹 루프 게인이 크고 위상 마진 등의 목표 성능이 만족되도록 설계되어야 한다[4]. 배속이 증가하고 트랙킹 루프의 대역폭이 증가함에 따라 위상 마진을 충분히 확보하기가 쉽지 않지만 대부분의 트랙킹 제어기는 위상 마진이 40° 이상이 되도록 설계되어야 한다. 정상적인 트랙킹 제어기 $C_f(s)$ 가 구동된 상태에서 외란 $D(j\omega)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$d(t) = e(t) + y(t), Y(j\omega) = P(j\omega)U_1(j\omega)$$

$$D(j\omega) = E_1(j\omega) + P(j\omega)U_1(j\omega)$$
(2)

$e_1(t)$ 와 $u_1(t)$ 는 정상적인 트랙 추종 제어에서의 트랙킹 에러와 제어기 입력을 나타낸다. (2)에서 액추에이터 모델 $P(j\omega)$ 는 모델링 불확실성을 포함하고 있기 때문에 공칭 액추에이터 모델 $P_n(j\omega)$ 을 대신 사용하고 트랙킹 루프 게인 조정에 의해 액추에이터 불확실성의 영향을 최대한 고려한 보정 상수 K_c 를 적용하면 트랙킹 외란은 다음과 같이 추정될 수 있다[1].

$$\hat{D}(j\omega) = E_1(j\omega) + K_c P_n(j\omega)U_1(j\omega)$$
(3)

액추에이터 불확실성에 대해서도 트랙킹 루프 게인을 항상 일정하게 유지하기 위해서는 액추에이터 불확실성의 정

도에 따라 역으로 트랙킹 제어기의 게인을 조정해주어야 한다. 이러한 트랙킹 루프 게인 조정 결과에 따라 보정 상수 K_c 는 결정될 수 있다.

본 논문에서는 검색 제어 후 액추에이터 잔존 속도에 의해 발생하는 액추에이터 흔들림량 $d_d(t)$ 를 추정한다. $d_d(t)$ 를 추정하기 위해 검색 제어 후 정상적인 트랙킹 제어기 $C_f(s)$ 를 적용한다. 그림 1의 gain-up 트랙 추종 제어 모드에서 액추에이터 흔들림량 $d_d(t)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$d(t) = e(t) + y(t), Y(j\omega) = P(j\omega)U_2(j\omega) + D_a(j\omega)$$

$$D(j\omega) = E_2(j\omega) + P(j\omega)U_2(j\omega) + D_a(j\omega)$$

$$D_a(j\omega) = D(j\omega) - E_2(j\omega) - P(j\omega)U_2(j\omega)$$
(4)

$e_2(t)$ 와 $u_2(t)$ 는 gain-up 트랙 추종 제어에서의 트랙킹 에러와 제어기 입력을 나타낸다. 디스크의 편심적인 회전에 의해 발생하는 트랙킹 외란 $d(t)$ 는 항상 일정하게 존재하기 때문에 추정된 트랙킹 외란 (3)과 $K_c P_n(j\omega)$ 를 (4)에 적용하면 액추에이터 흔들림량은 다음과 같이 추정될 수 있다.

$$\hat{D}_a(j\omega) = \hat{D}(j\omega) - E_2(j\omega) - K_c P_n(j\omega)U_2(j\omega)$$
(5)

트랙 검색 제어 후 액추에이터 잔존 속도가 큰 경우는 트랙을 넘어갈 수 있으므로 정현파 1개당 1 트랙피치를 나타내는 트랙킹 에러의 특성을 고려하여 실제 트랙킹 에러를 측정할 수 있다. 액추에이터 흔들림량 (5)는 디스크 회전 주파수의 정수배에서 상대적으로 큰 성분이 존재하는 트랙킹 외란의 특성과 달리 트랙 검색 제어의 속도 제어 영향으로 수 KHz에서 수십 KHz의 고주파 성분이 상대적으로 크게 존재한다. 추정된 트랙킹 외란과 액추에이터 흔들림량을 이용하여 gain-up 트랙 추종 제어 모드에서 트랙킹 에러가 최대 허용 에러 e_{max} 보다 작도록 하기 위한 최소 트랙킹 gain-up 루프 게인 $L_{umin}(j\omega)$ 를 구하면 다음과 같다.

$$E(j\omega) = \frac{\hat{D}(j\omega) - \hat{D}_a(j\omega)}{1 + L_u(j\omega)} \leq e_{max}$$
(6)

$$L_u(j\omega) \geq L_{umin}(j\omega) = \frac{\hat{D}(j\omega) - \hat{D}_a(j\omega)}{e_{max}}$$
(7)

검색 제어 후 액추에이터 흔들림을 최대한 빠르게 안정화시키기 위해서는 액추에이터 흔들림량이 매우 작아질 때까지 트랙킹 루프 게인이 (7)보다 크도록 설정되어야 한다.

III. 강인 트랙킹 gain-up 제어기의 설계

액추에이터 흔들림이 존재하는 gain-up 트랙 추종 제어 모드에서 트랙킹 gain-up 제어기를 포함하지 않은 gain-up 트랙 추종 시스템은 다음의 상태 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + H_1 p(t) + B_2 u(t)$$

$$e(t) = C_2 x(t) + H_2 p(t) + d(t) - d_a(t)$$

$$q(t) = E_1 x(t), p(t) = \Delta q(t), \|\Delta\| \leq 1$$
(8)

여기서 $x(t)$, $p(t)$, $d(t)$, $d_a(t)$ 는 상태 변수, 액추에이터 불확실성 입력, 편심에 의한 트랙킹 외란, 액추에이터 흔들림에 의한 외란 입력을 각각 나타내고 액추에이터 불확실성은 H_1 , H_2

E_1 행렬에 포함된다. 트래킹 gain-up제어기 $C_u(s)$ 는 증폭 계인 K_p 을 포함하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_u(t) &= A_u x_u(t) + B_u (K_p e(t)) \\ u(t) &= C_u x_u(t) \end{aligned} \quad (9)$$

트래킹 gain-up 제어기 (9)를 (8)에 적용하면 gain-up 트래킹 추종 시스템은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_{cl}(t) &= A_{cl} x_{cl}(t) + H_{1cl} p(t) + B_{1cl} (d(t) - d_a(t)) \\ e(t) &= C_{2cl} x_{cl}(t) + H_2 p(t) + d(t) - d_a(t) \\ q(t) &= E_{1cl} x_{cl}(t), \quad p(t) = \Delta q(t), \quad \|\Delta\| \leq 1 \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 $x_{cl}(t) = [x^T(t) \ x_u^T(t)]^T$ 는 gain-up 트래킹 추종 시스템의 상태 변수이고 시스템 행렬은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} A_{cl} &= \begin{bmatrix} A & B_2 C_u \\ K_p B_u C_2 & A_u \end{bmatrix}, \quad H_{1cl} = \begin{bmatrix} H_1 \\ K_p B_u H_2 \end{bmatrix}, \\ B_{1cl} &= \begin{bmatrix} 0 \\ K_p B_u \end{bmatrix}, \quad C_{2cl} = [C_2 \ 0], \quad E_{1cl} = [E_1 \ 0] \end{aligned} \quad (11)$$

엑츄에이터 흔들림이 존재하는 gain-up 트래킹 추종 제어 모드에서 트래킹 외란과 엑츄에이터 흔들림량에 대해 트래킹 에러가 최대 허용 에러보다 작기 위해서는 트래킹 루프 계인 $L_{min}(j\omega)$ 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 계인 (7)보다 계인이 조금 더 크도록 선택한다. 가중 함수의 입출력 관계를 토대로 출력 제어 신호 $z(t)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_w(t) &= A_w x_w(t) + B_w e(t) \\ z(t) &= C_w x_w(t) \end{aligned} \quad (12)$$

가중 함수 (12)를 gain-up 트래킹 추종 시스템의 (10)에 적용하면 가중 함수를 포함한 gain-up 트래킹 추종 시스템은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\bar{x}}(t) &= \bar{A}\bar{x}(t) + \bar{H}_1 p(t) + \bar{B}_1 (d(t) - d_a(t)) \\ z(t) &= \bar{C}_w \bar{x}(t) \\ q(t) &= \bar{E}_1 \bar{x}(t), \quad p(t) = \Delta q(t), \quad \|\Delta\| \leq 1 \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 $\bar{x}(t) = [x^T(t) \ x_w^T(t) \ x_u^T(t)]^T$ 는 가중 함수를 포함한 gain-up 트래킹 추종 시스템의 상태 변수이고 시스템 행렬은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \bar{A} &= \begin{bmatrix} A_{avg} & B_{avg} C_u \\ B_u C_{avg} & A_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 & B_2 C_u \\ B_w C_2 & A_w & 0 \\ K_p B_u C_2 & 0 & A_u \end{bmatrix}, \\ A_{avg} &= \begin{bmatrix} A & 0 \\ B_w C_2 & A_w \end{bmatrix}, \quad B_{avg} = \begin{bmatrix} B_2 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C_{avg} = [K_p C_2 \ 0], \\ \bar{H}_1 &= \begin{bmatrix} H_1 \\ B_w H_2 \\ K_p B_u H_2 \end{bmatrix}, \quad \bar{B}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ B_w \\ K_p B_u \end{bmatrix}, \quad \bar{C}_w = [0 \ C_w \ 0], \\ \bar{E}_1 &= [E_1 \ 0 \ 0] \end{aligned} \quad (14)$$

본 논문에서는 트래킹 외란과 검색 제어 후 엑츄에이터 흔들림에 대해 gain-up 트래킹 추종 시스템 (10)이 강인 안정하고 $\|T_{(d-d_a)z}(j\omega)\|_\infty < 1$ 과 목표로 하는 과도 응답 특성을 만족하는 트래킹 gain-up제어기 $C_u(s)$ 를 설계하는 문제를 다룬다. 엑츄에이터 흔들림을 최대한 빨리 안정화시키기 위해 상승 시간과 안정화 시간 등의 과도 응답 특성을 제어기 $C_u(s)$ 의 설계에서 고려한다. 만약 트래킹 gain-up제어기가 $\|T_{(d-d_a)z}(j\omega)\|_\infty < 1$ 를 만족한다면 $W(j\omega) > L_{min}(j\omega)$, (7)로부터 각 주파수에서 트래킹 에러가 최대 허용 에러 e_{max} 보다 작게 된다는 것을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} |E(j\omega)| &= \frac{|T_{(d-d_a)z}(j\omega)| |D(j\omega) - D_a(j\omega)|}{|W(j\omega)|} \\ &< \frac{|D(j\omega) - D_a(j\omega)|}{|W(j\omega)|} < \frac{|D(j\omega) - D_a(j\omega)|}{L_{u\min}(j\omega)} \\ &\cong \frac{|\hat{D}(j\omega) - \hat{D}_a(j\omega)|}{L_{u\min}(j\omega)} = e_{max} \end{aligned} \quad (15)$$

Gain-up 트래킹 추종 시스템이 강인 안정하고 $\|T_{(d-d_a)z}(j\omega)\|_\infty < 1$ 을 만족하는 트래킹 gain-up 제어기는 [2]의 Lemma 4로부터 다음의 식을 만족하는 행렬 $A_w, B_w, C_w, X_\infty > 0$ 와 상수 $\lambda_1 > 0$ 를 구하는 문제로 변환될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \bar{A}X_\infty + X_\infty \bar{A}^T & \bar{B}_1 & \bar{H}_1 & X_\infty \bar{C}_w^T & \lambda_1 X_\infty \bar{E}_1^T \\ \bar{B}_1^T & -I & 0 & 0 & 0 \\ \bar{H}_1^T & 0 & -\lambda_1 I & 0 & 0 \\ \bar{C}_w X_\infty & 0 & 0 & -I & 0 \\ \lambda_1 \bar{E}_1 X_\infty & 0 & 0 & 0 & -\lambda_1 I \end{bmatrix} < 0 \quad (16)$$

검색 제어 후 엑츄에이터 흔들림을 최대한 빨리 안정시키기 위해 상승 시간과 안정화 시간 등의 과도 응답 특성을 고려하여야 한다. 본 논문에서는 스텝 입력에 대한 상승 시간과 안정화 시간을 통해 시스템의 극점 위치를 제한하는 지역 안정 제한(regional stability constraint)을 트래킹 gain-up제어기 설계에서 고려한다. 일반적으로 페루프 시스템의 극점이 포함될 영역은 하나의 LMI 영역으로 나타낼 수 있다. 만약, 다음의 식을 만족하는 대칭 행렬 $\alpha = [\alpha_{kl}] \in R^{m \times m}$ 와 행렬 $\beta = [\beta_{kl}] \in R^{m \times m}$ 가 존재한다면 특정 영역 D 는 LMI 영역이다[8].

$$D = \{z \in C : f_D(z) = \alpha + z\beta + \bar{z}\beta^T < 0\} \quad (17)$$

여기서 $f_D(z) = [\alpha_{kl} + \beta_{kl}z + \beta_{lk}\bar{z}]_{1 \leq k, l \leq m}$ 이고 특성 방정식 $f_D(z)$ 는 $m \times m$ Hermitian 행렬의 공간에서 값을 가진다. 이러한 LMI 영역은 타원, 포물선, 섹터, 다각형 영역 등의 여러 영역을 나타낼 수 있다. 페루프 시스템의 극점이 존재해야 하는 특정 영역은 타원, 포물선, 다각형 영역 등으로 근사화하여 하나의 LMI 영역으로 나타낼 수 있다. 엑츄에이터 불확실성이 없는 공칭 gain-up 트래킹 추종 시스템의 경우($A=0$), 다음을 만족하는 대칭 행렬 $X_D > 0$ 이 존재하면 시스템 행렬 \bar{A} 의 모든 극점은 주어진 LMI 영역 D 에 존재하게 된다.

$$Y_D = \alpha \otimes X_D + \beta \otimes (\bar{A}X_D) + \beta^T \otimes (\bar{A}X_D)$$

$$= [\alpha_{ki} X_D + \beta_{ki} \bar{A} X_D + \beta_{ki} X_D \bar{A}^T]_{1 \leq k, i \leq m} \quad (18)$$

특정 영역 D 가 전체 안정화 영역일 때 (18)은 Lyapunov 안정화 조건이 된다.

스텝 입력에 대한 상승 시간과 안정화 시간은 감쇠 상수 ζ 와 natural 주파수 ω_n 에 의해 표현될 수 있기 때문에 목표로 하는 상승 시간과 안정화 시간을 설정하면 감쇠 상수 ζ 와 natural 주파수 ω_n 가 만족하는 영역을 구할 수 있고 이를 근사화하여 LMI region D 를 구할 수 있다. Gain-up 트랙 추종 시스템의 모든 극점이 설정한 LMI region D 에 존재할 조건은 다음의 식을 만족하는 행렬 $A_u, B_u, C_u, X_D > 0$ 와 상수 $\lambda_2 > 0$ 를 구하는 문제로 변환될 수 있다[2].

$$\begin{bmatrix} Y_D & \beta \otimes \bar{H}_1 & I \otimes \lambda_2 X_D \bar{E}_1^T \\ \beta^T \otimes \bar{H}_1^T & -\lambda_2 I & 0 \\ I \otimes \lambda_2 \bar{E}_1 X_D & 0 & -\lambda_2 I \end{bmatrix} < 0 \quad (19)$$

본 논문에서 고려한 gain-up 트랙 추종 시스템 (10)이 강인 안정하고 $\|T_{(d-d_0)}(j\omega)\|_\infty < 1$ 과 목표로 하는 과도 응답 특성을 만족하는 트랙킹 gain-up 제어기 $C_u(s)$ 를 설계하는 문제는 (16)과 (19)를 만족하는 트랙킹 gain-up 제어기를 설계하는 문제로 변환될 수 있다. (16)과 (19)의 비선형 항목을 선형화하기 위해 본 논문에서는 $X = X_x = X_D$ 제약을 도입하고 다음과 같이 행렬 X 를 분할하고 gain-up 트랙킹 제어기 행렬을 치환한다[8,9].

$$\begin{aligned} X &= \begin{bmatrix} R & M \\ M^T & U \end{bmatrix}, \quad X^{-1} = \begin{bmatrix} S & N \\ N^T & V \end{bmatrix} \\ \hat{B}_u &= NB_u, \quad \hat{C}_u = C_u M^T \\ \hat{A}_u &= SA_{aug} R + SB_{aug} C_u M^T + NB_u C_{aug} R + NA_u M^T \end{aligned} \quad (20)$$

최종적으로 트랙킹 gain-up 제어기 설계 문제는 2개의 LMI를 만족하는 트랙킹 gain-up 제어기 $C_u(s)$ 를 설계함으로써 완성된다. 설계된 트랙킹 gain-up 제어기는 액츄에이터 흔들림에 대해 강인 안정하고 트랙킹 에러가 항상 최대 허용 에러 e_{max} 보다 작게 유지되며 목표로 하는 상승 시간이나 안정화 시간 등의 과도 응답 특성을 만족하게 된다.

IV. 실험 결과

제안한 트랙킹 gain-up 제어기 설계 방법의 타당성을 보기 위해 본 논문에서는 DVD 기록기기의 트랙킹 gain-up 제어기 설계에 적용하였다. DVD 8배속에서 20트랙 검색 제어 후 액츄에이터 흔들림을 빠르게 제어하기 위해 제안한 제어기 설계 방법에 따라 트랙킹 gain-up 제어기를 설계하였다. 실험에서 사용한 DVD 기록기기의 트랙킹 액츄에이터는 공진 주파수 64 Hz, 감쇠 상수 0.079, DC 감도 1 mm/V이고 전압-전류 드라이버 게인이 3.65 이므로 액츄에이터 공칭 모델은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_n(s) = \frac{591.66}{s^2 + 63.73s + 161700} \left[\frac{M}{V} \right] \quad (21)$$

액츄에이터 파라미터들은 공칭값에서 10% 범위내에서 변하기 때문에 불확실성의 최대값을 $m_{b2}=29.58, m_{a1}=3.18,$

$m_{b2}=8085$ 로 설정하였다. 디지털 실험보드에서 DVD 디스크의 0.37 μm 에 대해 트랙킹 에러는 1.8V로 변환되므로 증폭 게인 K_p 는 4.86×10^6 [V/M]로 설정하였다. 트랙킹 루프 게인 조정 알고리즘을 적용한 결과 트랙킹 제어기의 DC 게인은 초기 게인의 1/1.1배로 감소하였다. 이것은 트랙킹 액츄에이터의 실제 게인이 (21)의 공칭 게인보다 1.1배 더 크다는 것을 나타내므로 보상 게인 K_c 를 1.1로 설정하였다.

그림 2는 (3)에 의해 DVD 8배속에서 트랙킹 외란을 추정 한 결과를 나타낸다. 최대 허용 에러 0.03 μm 에 대해 추정된 DVD 8 배속 트랙킹 진동량을 최대 허용 에러로 나누면 최소 트랙킹 루프 게인을 구할 수 있다. 본 논문에서는 트랙킹 루프 게인이 최소 트랙킹 루프 게인보다 크고 위상 마진이 40° 이상이 되도록 하는 다음의 트랙킹 제어기 $C_f(s)$ 를 실험에서 사용하였다.

$$\frac{1.1 \times 10^6 s^3 + 3.7 \times 10^{10} s^2 + 3.9 \times 10^{14} s + 1.2 \times 10^{18}}{s^4 + 1.8 \times 10^6 s^3 + 2.5 \times 10^{11} s^2 + 3.8 \times 10^{15} s + 1.9 \times 10^{18}} \quad (22)$$

그림 3은 정상적인 트랙킹 제어기 (22)을 적용하고 20 트랙 검색 제어 후 트랙킹 에러와 제어기 입력을 측정하여 (5)에 의해 액츄에이터 흔들림량을 추정한 결과이다. 그림 2와

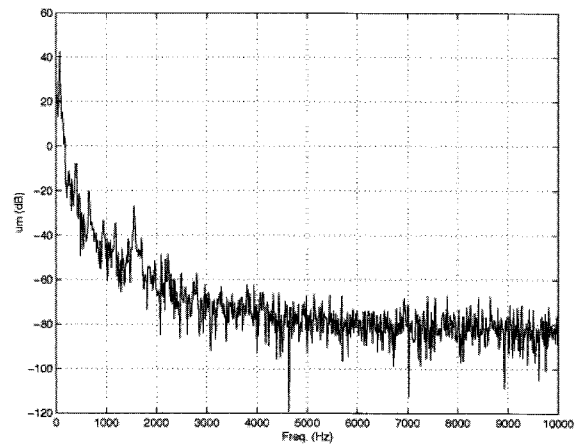


그림 2. 추정된 DVD 8X 트랙킹 진동량.
Fig. 2. The tracking disturbance estimated at DVD 8X.

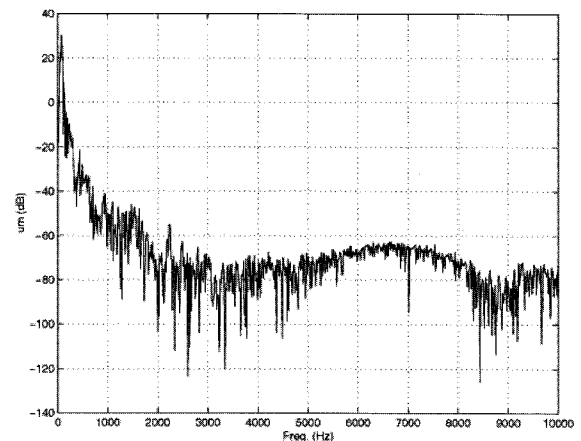


그림 3. 20 트랙 검색 후의 트랙킹 액츄에이터 흔들림량.
Fig. 3. The shake of tracking actuator after a seek action moving 20 tracks.

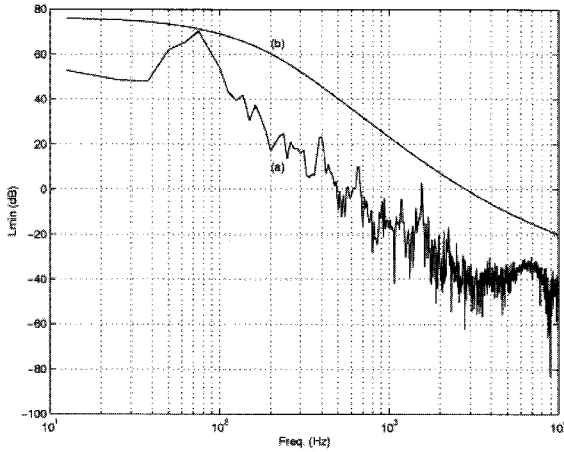


그림 4. DVD 8X 최소 트래킹 gain-up 루프 게인 (a)과 가중 함수의 주파수 특성 (b).
 Fig. 4. A minimum gain-up tracking open-loop gain of DVD 12X (a) and the Bode plot of the weighting function (b).

비교했을 때 3 KHz 이상의 고주파 성분의 외란이 상대적으로 증가한 것을 볼 수 있다. 액츄에이터 흔들림을 안정적으로 제어하기 위해 필요한 최소 트래킹 gain-up 루프 게인 $L_{min}(j\omega)$ 은 추정된 트래킹 진동량, 액츄에이터 흔들림량, 최대 허용 에러를 (7)에 적용하여 구할 수 있다.

그림 4(a)는 최대 허용 에러가 0.03 μm 인 DVD 8 배속의 최소 트래킹 gain-up 루프 게인을 나타낸다. 가중 함수 $W(s)$ 는 그림 4(a)의 최소 트래킹 gain-up 루프 게인보다 조금 더 큰 게인을 가지도록 선택하였다. 그림 4(b)는 가중 함수의 주파수 특성을 나타낸다.

$$W(s) = \frac{4956s^2 + 3.04 \times 10^8 s + 3.36 \times 10^{12}}{s^3 + 2344s^2 + 2.16 \times 10^6 s + 5.24 \times 10^8} \quad (23)$$

20 트랙 검색 제어 후 안정적인 트랙 추종 제어를 위해 상승 시간을 0.5 ms, 안정화 시간 2 ms 이내로 설정하였고 극점의 최대 크기를 제한하여 트래킹 gain-up 제어기가 너무 높은 주파수 계인과 빠른 동역학을 가지지 않도록 하였다.

$$\frac{1.8}{\omega_n} \leq 0.5 \text{ ms}, \quad \frac{3}{\xi\omega_n} \leq 2 \text{ ms} \quad (24)$$

목표로 하는 상승 시간과 안정화 시간에 대한 과도 응답 특성을 만족하기 위해 ξ 와 ω_n 은 $\omega_n \geq 3600$, $\xi\omega_n \geq 1500$ 을 만족하여야 한다. 그리고 시스템의 극점은 100 KHz 이내로 제한하였다. 이를 토대로 gain-up 트랙 추종 시스템의 모든 극점이 존재하여야 하는 특정 영역은 감쇠 상수, natural 주파수의 범위, 최대 크기로부터 구할 수 있다. 특정 영역은 하나의 부동식 형태로 표현될 수 없기 때문에 다음과 같이 타원 영역 Ω 로 특정 영역을 근사화하였다.

$$\Omega = \{z \in \mathbb{C} : f_D(z) := \alpha + z\beta + \bar{z}\beta^t < 0\}$$

$$\alpha = \begin{bmatrix} 7200 & 0 \\ 0 & -32500 \end{bmatrix}, \quad \beta = \begin{bmatrix} 1 & -0.5 \\ 0.5 & 0 \end{bmatrix} \quad (25)$$

공칭 모델 (21), 가중 함수 (23), LMI 영역 (25)에 대해 MATLAB LMI Toolbox를 사용하여 (16)와 (19)를 만족하는 강

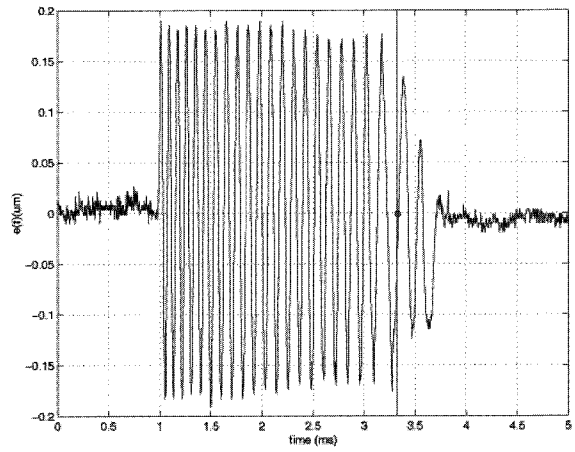


그림 5. 정상 트래킹 제어기 $C_f(s)$ 를 적용했을 때의 트래킹 에러.
 Fig. 5. The tracking error after applying the normal tracking controller $C_f(s)$.

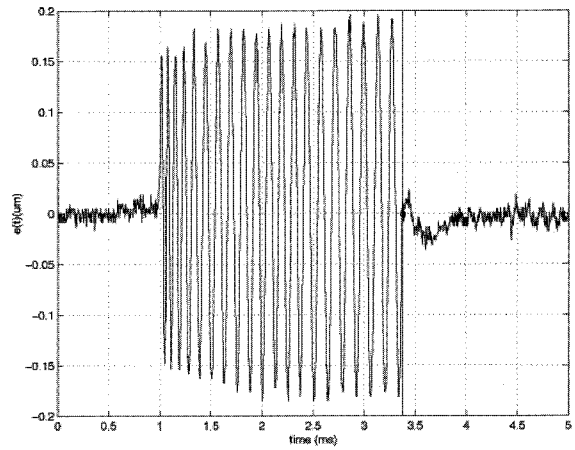


그림 6. 트래킹 gain-up 제어기 $C_i(s)$ 를 적용했을 때의 트래킹 에러.
 Fig. 6. The tracking error after applying the tracking gain-up controller $C_i(s)$.

인 트래킹 gain-up제어기를 설계하면 다음과 같다.

$$\frac{1.8 \times 10^6 s^3 + 6.1 \times 10^{10} s^2 + 5.9 \times 10^{14} s + 1.6 \times 10^{18}}{s^4 + 1.5 \times 10^6 s^3 + 2.1 \times 10^{11} s^2 + 3.2 \times 10^{15} s + 1.6 \times 10^{18}} \quad (26)$$

그림 5는 20 트랙 검색 제어 후 정상적인 트래킹 제어기를 적용하였을 때의 트래킹 에러를 나타낸다. 검색 제어 동작은 약 2.3 ms 동안 실행되었고 ‘o’로 표시된 부분부터 트래킹 제어를 시작하였는데 검색 제어 후 액츄에이터 흔들림으로 인한 고주파 외란 성분을 충분히 제어하지 못해 약 0.5 ms동안 트래킹 에러가 최대 허용 에러 0.03 μm 보다 커지는 것을 알 수 있다.

그림 6은 설계된 트래킹 gain-up 제어기를 적용하였을 때의 트래킹 에러를 나타낸다. 검색 제어 동작은 약 2.4 ms 동안 실행되었고 ‘o’로 표시된 부분부터 gain-up 트랙 추종 제어를 시작하였는데 액츄에이터 흔들림이 존재하더라도 트래킹 에러가 최대 허용 에러보다 작게 됨을 알 수 있다. 검색 제어 후 액츄에이터에 잔존하는 속도에 따라 액츄에이터 흔

흔들림량이 달라지기 때문에 gain-up 트랙 추종 제어를 실행하는 시간이 달라질 수 있다. 최종적으로 트랙킹 에러가 최대 허용 에러보다 작아질 때 정상적인 트랙 추종 제어로 전환된다.

V. 결론

본 논문에서는 검색 제어 후 발생하는 트랙킹 액츄에이터 흔들림을 안정적으로 제어하기 위한 강인 트랙킹 gain-up 제어기 설계 방법을 제안하였다. 제어기 설계를 위해 액츄에이터 흔들림량을 추정하였고 이를 토대로 최소 트랙킹 gain-up 루프 게인을 구하였다. 액츄에이터 흔들림을 최대한 빠르고 안정적으로 제어하기 위해 지역 안정 제한 조건을 통한 과도 응답 특성을 고려하였다.

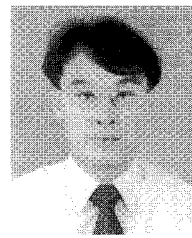
과도 응답 특성을 고려한 강인 트랙킹 gain-up 제어기 설계 문제는 두 개의 LMI 조건을 만족하는 제어기 설계 문제로 변환될 수 있다. 본 논문에서 제안한 트랙킹 gain-up 제어기 설계 방법의 타당성을 보이기 위해 DVD 기록기기의 트랙킹 gain-up 제어기 설계에 적용하였다.

참고문헌

- [1] 이문노, 진경복, 윤기봉, "진동량 추정을 통한 강인 트랙킹 제어기의 설계," 제어·자동화·시스템공학 논문지, 제13권 제9호, pp. 856-860, 2007.
- [2] 이문노, 진경복, 김진수, "다중 제한 조건을 고려한 강인 트랙 추종 제어기의 설계," 한국소음진동공학회 논문지, 제14권 제9호, pp. 827-836, 2004.
- [3] J.-Y. Choi, H.-G. Jun, C.-H. Chun, M.-N. Lee, H.-S. Yang, and Y.-P. Park, "Disturbance measurement of optical disc and servo loop design related to its result," *Int. conf. on motion and vibration control*, pp. 326-332, 2002.
- [4] 진경복, 이문노, "광디스크 드라이브의 진동 제어 기술," 한국소음진동공학회지, 제13권 제2호, pp. 48-55, 2003.
- [5] T. H. Lee, T. S. Low, A. Al-Mamum, and C. H. Tan, "Internal model control approach for designing disk drive servo-controller," *IEEE Trans. Indus. Electr.*, vol. 42, pp. 248-256, 1995.
- [6] Y. T. Teo and T. T. Tay, "Application of the l_1 -optimal regulation strategy to a hard disk servo system," *IEEE Trans.*

Contr. Syst. Tech., vol. 4, pp. 467-472, 1996.

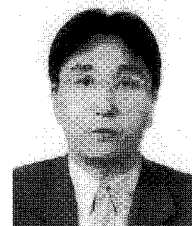
- [7] J. Y. Yen, F. J. Wang, and Y. Y. Chen, "A fuzzy scheduling controller for a computerdisk file track following servo," *IEEE Trans. Indus. Electr.*, vol. 40, pp. 266-272, 1993.
- [8] M. Chilali and P. Gahinet, " H_∞ design with pole placement constraints: An LMI approach," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 41, pp. 358-367, 1996.
- [9] C. Scherer, P. Gahinet, and M. Chilali, "Multiobjective output-feedback control via LMI optimization," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 42, pp. 896-911, 1997.
- [10] G. Garcia and J. Bernussou, "Pole assignment for uncertain systems in a specified disk by state-feedback," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 40, pp. 184-190, 1995.
- [11] R. K. Yedavalli and Y. Liu, " H_∞ control with regional stability constraints," *Automatica*, vol. 31, pp. 611-615, 1995.
- [12] S. Boyd, L. E. Ghaoui, E. Feron, and V. Balakrishnan, *Linear Matrix Inequalities in Systems and Control Theory*, Philadelphia, PA: SIAM, 1994.



진경복

1961년 5월 19일생. 1985년 한양대학교 전기공학과(공학사). 1987년 한양대학교 전기공학과(공학석사). 1999년 한국과학기술원 자동화 및 설계공학과(공학박사). 2001년~현재 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부 부교수. 관심분야

는 광 메카트로닉스 제어, 강인 제어, 광 신호처리, 진동 제어.



이문노

1969년 3월 11일생. 1991년 경북대학교 전자공학과(공학사). 1993년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학석사). 1998년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학박사). 2001년 9월~현재 동의대학교 컴퓨터공학과 부교수. 관심분야

는 강인 제어, 임베디드 시스템, 지능형 시스템.