

〈논 문〉

DVD 드라이브의 포커스 서보 시스템 제어기 설계

Control System Design for the Focus Servo System of DVD Drive

한 기 봉* · 이 시 복**

Ki-Bong Han and Shi-Bok Lee

(2000년 6월 7일 접수 ; 2000년 12월 22일 심사완료)

Key Words : DVD Drive, Two-Degree-of Freedom Controller(2자유도 제어기), Inverse Dynamics(역동역학), LQG/LTR Feedback Controller(LQG/LTR 귀환 제어기), Disturbance Rejection Performance(외란제거 성능)

ABSTRACT

In this paper, two plant models, of which one is newly developed and the other one is the conventional one, of the focus servo system of DVD drive are presented and a two-degree-of freedom controller consisted of inverse dynamics feedforward and LQG/LTR feedback controller is designed. The newly developed plant model is used to design the feedforward controller and the conventional model is used for the design of feedback controller. The output of newly developed model is the displacement of objective lens and the output of conventional model is the focus error of the DVD focus servo system. The displacement of the objective lens is estimated by the dynamics model of the DVD focus servo system. The disturbance rejection performance of the two-degree-of freedom controller is compared with that of an LQG/LTR one.

1. 서 론

DVD(digital versatile disc)관련 기술은 DVDP(DVD player)에서 고밀도 기록장치인 DVD-ROM형태로 발전하였으며, 최근 기록 및 재생이 모두 가능한 DVDR쪽으로 더욱더 발전해 가고 있다.⁽¹⁾ 이와 같은 광학을 이용한 데이터 저장 장치의 DVD헤드 구동부는 일반적으로 세 개의 구동기로 구성된다. 포커스를 유지시키는 구동기와 정밀 트랙을 추종하는 구동기가 하나의 몸체로 구성되어 있고, 이들을 디스크의 수평방향으로 이동시키는 슬레드(sled) 구동기가 있다. 여기서, 포커싱 제어기 설계는 구동기의 노화, 특히, 광 디스크의 불량 등으로 인하여 강인한 제어성능을 가진 서보 제어기를 설계하는 데에 많은 어려움이 있다.^(2,3) 정확한 포커싱을 위해서는 이러한 불확실성과 외란에 대해서 포커스 오차가 허용오차 내에 존재하고, 과도응답의 사양에 만족되도록 제어기가 설계되어야 한다.⁽⁴⁾ 이

에 대한 연구가 많이 진행되고 있지만, 포커싱 서보를 위해서 제어대상 플랜트를 광 픽업(구동부)과 디스크의 반사면 까지 포함시켰기 때문에 광 픽업과 디스크의 반사면 사이의 플랜트 특성파악이 어렵다. 특히, 디스크는 사용시 손상이 잘 될 뿐 만 아니라, 통일된 규격이라 할지라도 제작사에 따라 차이가 다양하기 때문에 이 모든 디스크의 특성을 파악하기란 더욱 어렵다. 또한 기존 광 픽업 제어플랜트는 디스크와 픽업사이의 거리 변동을 외란으로 간주하기 때문에, 광 픽업 시스템에 대한 포커스 오차를 줄이는 데에 한계가 있다.

본 연구에서는 앞에서 언급한 문제점들을 극복하기 위하여 포커스 서보제어를 위한 제어대상플랜트를 2가지 관점에서 정의를 하고, 포커스 서보를 위하여 2자유도 제어기를 설계하였다. 하나는 제어대상플랜트를 대물렌즈(objective lens)를 포함한 픽업장치만을 포함했고 다른 하나는 기존에 방법과 같이 광 픽업과 디스크 반사면 까지를 포함하여 각각 플랜트에 대한 제어기를 설계하였다. 전자에서 제어목적은 대물렌즈의 위치를 제어하는 것인데, 대물렌즈의 위치를 제어하기 위해서는 대물렌즈의 위치를 측정할 센서가 필요하다. 그러나, 가격과 기술적인 면에서 제약 받기 때문에 센서가 필요 없는 역동역학을 이용한 피

* 대우전자

** 정회원, 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소

E-mail : sblee@hyowon.pusan.ac.kr

Tel : (051)510-2315, Fax : (051)514-7640

드포워드 제어기를 적용하였다. 여기서, 제어목적은 디스크와 대물렌즈사이의 포커스를 일정하게 유지하는데 있다. 다시 말하면, 포커스를 일정하게 유지시키기 위해서 포커스 오차를 유발시키는 외란을 제어기의 기준입력으로 하고, 제어된 플랜트의 출력을 대물렌즈가 움직인 변위로 한다. 후자는 기존의 외란 제어를 목적으로 한 LQG/LTR 제어기이다. 플랜트의 불확실성과 귀환 제어기의 특성상 포커스 오차를 줄이는데는 한계가 있다. 여기서 제어기의 안정성을 향상시킴과 동시에 포커스 오차를 줄이기 위해서 두 가지 제어기를 동시에 적용하였다. 이때, 피드포워드 제어기는 추종성능을 향상시킴으로서 포커스오차를 줄이고, 귀환 제어기는 안정성을 증대시킴과 동시에 외란 제거 성능을 향상시킴으로서 포커스오차를 줄인다. 제안한 제어기의 성능을 평가하기 위해 모의실험을 통하여 기존의 LQG/LTR 귀환 제어기와 비교한 결과 제안한 방법이 포커스오차를 줄이는데 성능이 우수함을 보였다.

2. 제어대상 플랜트의 제안 및 모형화

Fig. 1은 광 디스크 드라이브의 포커스 서보시스템의 모형을 나타낸다.⁽⁵⁾ 여기서 m_F, D_F, K_F 는 각각 대물렌즈의 질량, 구동기의 감쇠, 구동기의 스프링상수이다. 좌표 $x(t), y(t)$ 는 각각 대물렌즈의 변위, 드라이브 베이스로부터 전달되는 진동변위를 나타내고, $e(t)$ 는 광 디스크와 대물렌즈의 포커스사이의 거리변화를 나타낸다. 광 디스크 드라이브의 포커스 서보시스템의 목적은 운전중에 $e(t)$ 를 0으로 수렴하게 함으로서 포커스를 지속적으로 유지시키는데 있다.

Fig. 2는 광학계의 구성도를 나타낸다.⁽⁶⁾ 광학계의 구성요소는 레이저 다이오드, 콜리메이터 렌즈, 프리즘, 모니터링 포토다이오드, 대물렌즈, 필드렌즈, 비점수차 발생부,

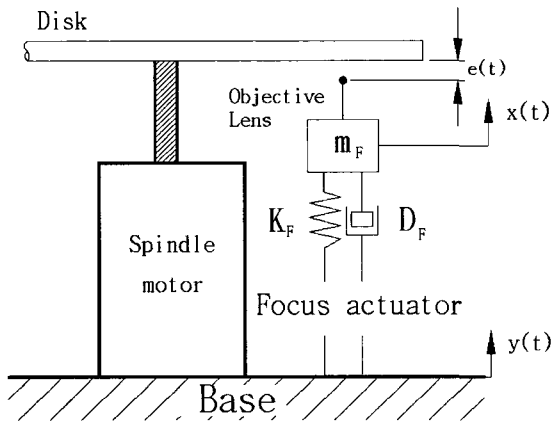


Fig. 1 Focus servo system of an optical disc drive

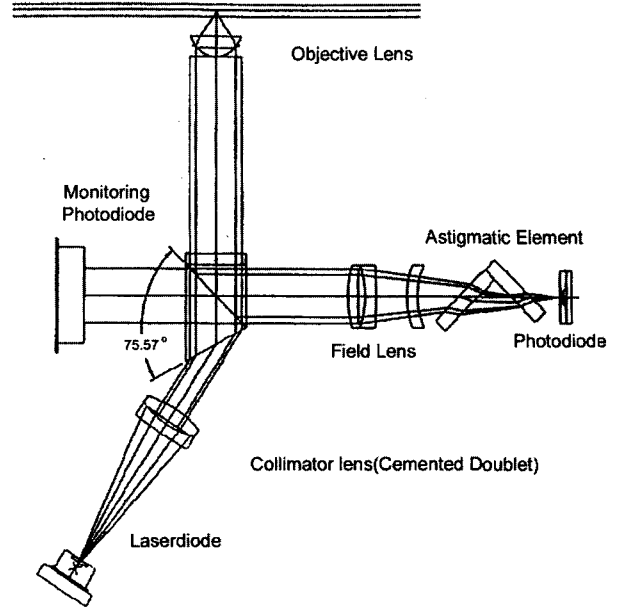
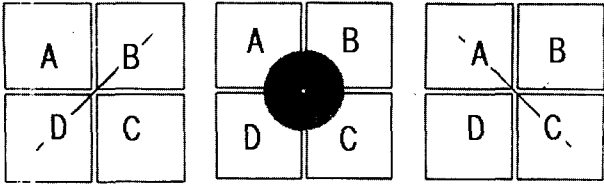


Fig. 2 Structure of the optical pickup system

포토다이오드이다. 먼저, 레이저다이오드에서 발광된 레이저는 콜리메이터 렌즈를 지나면서 평행 광으로 바뀌고, 평행 광은 프리즘을 통과하면서, 두 방향으로 빛이 분산되어 직진한다. 하나는 모니터링 포토다이오드에 접근하고, 또 다른 한 방향은 대물렌즈를 통과한다. 모니터링 포토 다이오드는 빛이 강도를 일정하게 유지시키기 위해 필요하고, 대물렌즈를 통과한 빛은 포커스를 광 디스크에 형성하게 한다. 디스크상의 포커스 오차정도에 따라 광 디스크의 반사광 스폿(spot)의 크기가 다르다. 역으로, 반사된 광은 대물렌즈를 지나 프리즘에 도달하게되고, 프리즘은 다시 레이저 다이오드 방향과 포토다이오드 방향으로 빛을 직진시키는데, 레이저 다이오드방향으로 직진한 빛은 이용되지 않고, 포토 다이오드로 직진한 광만을 이용하여 디스크상의 초점정도를 결정한다. 프리즘을 통과한 빛은 필드렌즈를 지나 비점수차 발생부를 통과하여 포토 다이오드에 도달하게되고, 포토 다이오드에 도달한 빛은 광량에 의해 포커스정도를 결정하게된다. 여기서, 포커스 제어의 목적은 대물렌즈에 의해 형성된 포커스를 디스크상에 항상 존재하게 하는데 있다.

Fig. 3은 비점 수차법에 의한 포토 다이오드에서 광 스폿의 형상변화를 나타낸다.⁽⁷⁾ (a)는 디스크상의 스폿이 포커스 거리밖에 존재할 때, (b)는 초점이 디스크상에 존재할 때, (c)는 디스크상의 스폿이 포커스 거리내에 존재할 때, 각각 A, B, C, D포토다이오드 상에 생기는 빛의 스폿의 형상을 나타낸다. 이때 각 포토다이오드에서 발생하는 전류를 이용하여 포커스 오차 $e(t)$ 를 측정할 수 있다. 포커스오차 $e(t)$ 는 다음과 같이 구한다.



(a) Mis-focus(-) (b) In focus(0) (c) Mis-focus(+)
 Fig. 3 Beam shape at the photo diode by astigmatic method

$$e(t) = \{(I_A + I_B) - (I_C + I_D)\} \quad (1)$$

식 (1)에서 I_A, I_B, I_C, I_D 는 각각 포토다이오드에서 발생하는 전류값을 나타낸다. 광 디스크 드라이브의 포커스 서보시스템의 운동방정식은 다음과 같다.

$$m_F \ddot{x}(t) + D_F (\dot{x}(t) - \dot{y}(t)) + K_F (x(t) - y(t)) = f(t) \quad (2)$$

식 (2)를 라플라스 변환하여 나타내면 다음과 같이 표현된다.

$$(m_F s^2 + D_F s + K_F)X(s) = (D_F s + K_F)Y(s) + F(s) \quad (3)$$

Fig. 1에 나타낸 제어대상 플랜트를 두 가지 관점에서 모델화 할 수 있는데, 하나는 Fig. 4에 나타낸 것 과 같다. Fig 4에서 $d(s)$ 는 디스크 면의 진동량이고, $m(s), e(s)$ 는 각각 포커스 서보시스템의 베이스로부터 대물렌즈에 전달되는 진동의 크기 및 포커스오차를 나타낸다. $K_{LQG/LTR}, G(s), D(s)$ 은 각각 보상기, 구동기, 외란 전달함수, 광학계 특성을 나타낸다.

구동기 전달함수 $G(s)$ 와 외란에 대한 전달함수 $D(s)$ 그리고, 포커스오차 $e(s)$ 는 각각 다음과 같다.

$$G(s) = \frac{1}{m_F s^2 + D_F s + K_F} \quad (4)$$

$$D(s) = \frac{1(D_F s + K_F)}{m_F s^2 + D_F s + K_F} \quad (5)$$

$$e(s) = (r(s) + x(s)) \quad (6)$$

여기서는 제어기 설계시 구동기, 디스크의 반사면, 광학계를 제어대상 플랜트로 했기 때문에 플랜트 출력은 $e(s)$ 가 된다. 이때, 디스크의 반사면과 광학계의 특성을 모델링하는 것은 쉽지 않기 때문에 디스크의 반사면과 초점사이의 거리변화 $r(s)$ 를 외란으로 간주하고, 광학계의 특성을 모델링오차에 반영하여 제어기를 설계한다. Fig. 5는 기존의 제어대상 시스템과는 다른 관점에서 정의된 제어 대상 플랜트를 나타낸다.

여기서, 광학계를 하나의 시스템으로 하고, 구동부를 또 다른 하나의 시스템으로 한다. 구동부와 광학부에서 발생되는 외란 $r(s)$ 를 기준입력으로 할 때, 플랜트의 출력은 대물렌즈의 변위 $x(s)$ 가 된다. 이 때, 대물렌즈의 변위를 측정하기 위해서는 센서가 필요하다. 그러나, 여러 가지 제약으로 센서를 설치하기 어렵고, 따라서 $x(s)$ 를 측정할 수가 없다. 여기서, $x(s)$ 를 구하기 위해서 공칭 플랜트를 이용하여 $x(s)$ 의 추정값 $\hat{x}(s)$ 를 계산한다. 또한, 제어기 기준입력 $r(s)$ 는 측정된 포커스오차 $e(s)$ 와 추정값 $\hat{x}(s)$ 를 이용하여 추정값 $\hat{r}(s)$ 를 구한다. 따라서, 포커스 서보 플랜트는 외란을 직접추정하지 못하기 때문에 추정값 $\hat{r}(s)$ 를 이용한다. 본 연구에서는 이 두 가지 모형을 동시에 적용함으로써 2자유도 제어기를 갖는 제어시스템을 설계할 수 있다. 여기서, 피드포워드 제어기는 기준입력에 대한 추종성능을 향상시키고, 피드백 제어기는 외란제거 성능 및 제어기의 안정성을 증대시킴으로서 포커스오차를 줄일 수 있다.

3. 제어기 설계

본 연구에서는 제안된 플랜트의 제어를 위해서 피드포워드 제어와 피드백 제어기로 구성된 2자유도 제어기를 적용하였다. 여기서 플랜트의 동 특성을 알 수 있기 때문에, 추종성능을 향상시키기 위해서 피드포워드 제어기로서 역동역학을 이용하였다. 광 디스크에 지배적인 외란은 대물렌즈와 디스크사이의 거리변동인데 반하여, 여기서는 대물렌즈와 디스크사이의 거리변동을 기준입력으로 이용하였다. 피드백 제어기는 제어성능이 좋고, 모델링오차에 대한 안정도-강인성을 가진 LQG/LTR 제어기를 적용하였다.

3.1 피드포워드 제어기 설계

식 (2)를 상태공간 모델식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_p(t) &= A_p x_p(t) + B_p u(t) + L_p n(t) \\ y_p(t) &= C_p x_p(t) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, $A_p, B_p, C_p, L_p, x_p(t)$ 는 각각 다음과 같다.

$$A_p = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{K_f}{m_F} & -\frac{D_F}{m_F} \end{bmatrix}, \quad B_p = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m_F} \end{bmatrix}$$

$$C_p = [1 \ 0], \quad L_p = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{K_F}{m_F} & \frac{D_F}{m_F} \end{bmatrix}$$

$$x_p(t) = [x(t) \ \dot{x}(t)]^T, \quad n(t) = [y(t) \ \dot{y}(t)]^T$$

식 (7)을 플랜트 전달함수 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$G(s) = C_p (sI - A_p)^{-1} B_p \quad (8)$$

식 (8)에서 모터의 동특성을 첨가시키면 아래와 같이 유도된다. 식 (3)에서 $F(s)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$F(s) = I(s)lBn \quad (9)$$

$$V(s) = LsI(s) + RI(s) \quad (10)$$

식 (9)에서 l 은 전기자 코일 길이, B 는 자속밀도, n 은 코일권수를 나타낸다.

식 (3), (9), (10)을 조합하여, 입력전압 $V(s)$ 에 대한 출력변위 $X(s)$ 의 전달함수를 다음과 같이 구한다.

$$G_e(s) = C_p (sI - A_p)^{-1} B_p \cdot \frac{R/L}{s + R/L} \quad (11)$$

식 (11)에서 R 과 L 은 각각 저항과 인덕턴스를 나타내고, 이 부분의 특성은 기계시스템에 비하여 주파수가 높기 때문에 서보특성에 영향을 주지 않는다.⁽⁸⁾ Fig. 4에서 제어 입력 $u_f(s)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u_f(s) = -K_f(s) \hat{r}(s) \quad (12)$$

여기서 식 (12)에서 피드포워드 제어기 전달함수 $K_f(s)$ 를 z -영역에서 구하기 위해서, 먼저 플랜트를 이산전달함수(discrete transfer function)로 표현 한다. 플랜트를 영차홀더(zero-order-holder)법을 이용하여, z -영역에서 나타내면 다음과 같다.

$$G(z^{-1}) = \frac{N_p(z^{-1})}{D_p(z^{-1})} \quad (13)$$

여기서, 제어기의 대역폭과 DVD배속, 광디스크의 규격 및 디스크 면진을 고려하여 샘플링시간을 88.2 kHz로 하였다. 식 (11)에서 $N_p(z^{-1})$, $D_p(z^{-1})$ 는 각각 다음과 같다.

$$D_p(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}$$

$$N_p(z^{-1}) = (b_1 + b_2 z^{-1}) z^{-1}$$

피드포워드 제어력은 제안된 포커스 서보 시스템의 역동역학을 이용하여 플랜트가 원하는 궤적을 추적하도록 하기 위한 개루프 제어신호이다. 플랜트의 역 전달함수를 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{u_f(k)}{x(k)} = \frac{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}}{(b_1 + b_2 z^{-1}) z^{-1}} \quad (14)$$

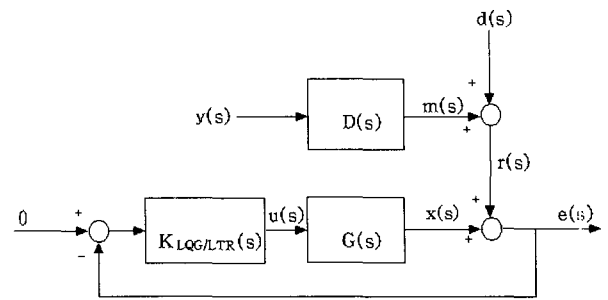


Fig. 4 Block diagram of the focus servo-system

Fig. 5에서 피드포워드항은 식 (14)에서 구한 역 전달함수이다. 따라서 피드포워드 제어기의 제어력 $u_f(k)$ 를 구하면 다음과 같다.^(9, 10)

$$u_f(k) = \{ \hat{r}(k+1) + a_1 \hat{r}(k) \} + a_2 \hat{r}(k-1) - b_2 u_f(k-1) / b_1 - b_2 u_f(k-1) \quad (15)$$

식 (15)에서 $\hat{r}(k)$ 는 디스크와 대물렌즈사이의 추정된 상대변위이다. 이것을 직접적으로 측정하기는 어렵기 때문에, Fig. 5에서와 같이 포커스오차와 대물렌즈의 변위로 계산이 가능하다. 여기서 대물렌즈의 변위를 측정하기가 어렵기 때문에 본 연구에서는 포커스 서보시스템모형을 통하여 대물렌즈의 변위를 추정하였다. 따라서 추정된 외란 $\hat{r}(k)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{r}(k) = e(k) + \hat{x}(k) \quad (16)$$

식 (16)에서 $\hat{x}(k)$ 는 플랜트의 모델식을 이용하여 구하면 다음과 같다.

$$\hat{x}(k) = -a_1 \hat{x}(k-1) - a_2 \hat{x}(k-2) + b_1 u(k-1) + b_2 u(k-2) \quad (17)$$

시스템 매개 변수값들을 알면 피드포워드 입력만으로도 원하는 궤적을 잘 추적할 수 있다. 그러나 시스템 매개 변수들은 모델링에 대한 오차가 존재하기 때문에 피드포워드 제어만으로는 원하는 궤적을 잘 추적할 수 없을 뿐만 아니라, 모델링 오차에 대하여 강인성을 확보하기가 어렵다. 이를 보완하기 위하여 LQG/LTR 제어기를 적용하였다.

3.2 LQG/LTR 제어기설계

Fig. 1과 같이 1자유도를 갖는 기계시스템으로 모델된 광 디스크드라이브의 포커스 서보 시스템에 외란 및 모델링오차에 대하여 강인성을 갖는 LQG/LTR 제어기를 적용하였다.

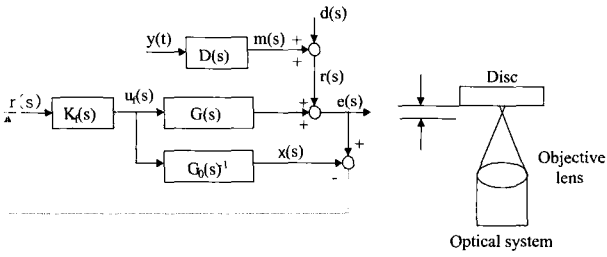


Fig. 5 Block diagram of the control system

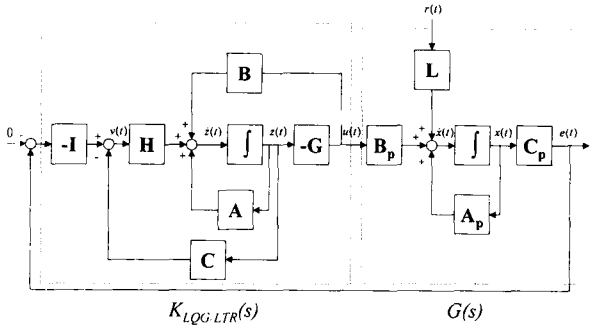


Fig. 6 Output feedback control system

Fig. 6은 LQG/LTR 보상기의 구조를 나타낸다.^(11, 12) 이는 설계사양에 따라 원하는 루프의 형상을 만족하도록 목표필터를 설계하고, 루프전달 회복방법을 이용하여 보상된 시스템의 루프전달함수의 특이값 형상으로 회복시키는 조직적 과정으로 이루어진다. LQG/LTR 보상기는 두 개의 귀환루프를 가진 설계플랜트모델의 복사된 구조로 이루어진다. 여기서, 귀환루프는 각각 이득행렬 H 와 G 를 포함한다. 식 (7)에서 $y_p(t)$ 는 출력변수로 광 디스크 드라이브 포커스오차 $e(t)$ 를 나타낸다. 먼저 LQG/LTR 제어기 설계시, 목표필터의 필터이득 행렬 H 는 다음식을 이용하여 구해진다.

$$H = \frac{PC_p^T}{\mu} \quad (18)$$

여기서, 행렬 P 는 필터대수 리카티식(filter algebraic Riccati equation)에서 구한다. 필터 대수 리카티식은 다음과 같다.

$$A_p P + P A_p^T + L L^T + \frac{1}{\mu} P C_p^T C_p P = 0 \quad (19)$$

여기서, 설계변수 μ 와 L 은 각각 원하는 대역폭과 루프형상을 만족하도록 다음의 칼만필터 등가식으로 구한다.

$$G_{TFL}(s) = C_p (sI - A_p)^{-1} L / \mu \quad (20)$$

루프 전달회복 과정은 보상된 플랜트의 루프전달함수

$G(s)K_{LQG/LTR}(s)$ 를 목표 필터루프 $G_{TFL}(s)$ 로 회복시키는 단계이다. 제어이득행렬 G 는 다음식에서 구해진다.

$$G = \frac{1}{\rho} B_p^T K \quad (21)$$

식 (21)에서 행렬 K 는 출력가중행렬 $Q = C_p^T C_p$ 로 놓고, 제어가중변수 ρ 가 0으로 접근할 때, 다음의 제어대수 리카티식을 풀어서 구한다.

$$K A_p + A_p^T K + Q - \frac{1}{\rho} K B_p B_p^T K = 0 \quad (22)$$

제어가중변수 ρ 가 0으로 접근할 때, 플랜트 전달함수 $G(s)$ 와 보상기 전달함수 $K_{LQG/LTR}(s)$ 의 곱인 루프전달함수 $T(s)$ 의 극한 거동은 다음과 같다.

$$\lim_{\rho \rightarrow 0} T(s) = \lim_{\rho \rightarrow 0} G(s)K_{LQG/LTR}(s) = \lim_{\rho \rightarrow 0} G_{TFL}(s) \quad (23)$$

식 (23)은 루프전달함수 $K(s)$ 가 목표필터루프 전달함수 $G_{TFL}(s)$ 로 회복됨을 나타낸다. 이상과 같이 s -영역에서 설계된 LQG/LTR제어기를 플랜트에 적용하기 위해서 z -영역으로 변환시킨다. 이때 샘플링 시간을 88.2 kHz로 할 때 보상기 전달함수는 다음과 같다.

$$K_{LQG/LTR}(z^{-1}) = \frac{(c_1 + c_2 z^{-1}) z^{-1}}{1 + d_1 z^{-1} + d_2 z^{-2}} \quad (24)$$

식 (24)에서, 제어입력 $u_{LQG/LTR}(k)$ 를 구하면 다음과 같다.

$$u_{LQG/LTR}(k) = c_1 e(k-1) + c_2 e(k-2) - d_1 u_{LQG/LTR}(k-1) - d_2 u_{LQG/LTR}(k-2) \quad (25)$$

3.3 2자유도 제어기구성

Fig. 7은 광 드라이브 포커스 서보시스템 제어를 위하여 피드포워드 제어기와 피드백 제어기로 구성된 2자유도를 갖는 제어기이다. 여기서, 피드포워드 제어기의 제어대상 플랜트의 출력은 대물렌즈의 변위이고, LQG/LTR 피드백제

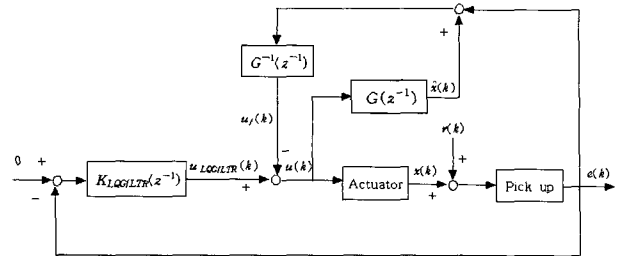


Fig. 7 Servo-system of a two degree of freedom

어기의 제어대상 플랜트 출력은 대물렌즈와 디스크 반사면 및 픽업부를 통과해서 출력되는 포커스오차이다.

광 드라이브 포커스 서보시스템에 적용된 2자유도 제어기의 제어력 $u(k)$ 는 다음과 같다.

$$u(k) = u_{LQG/LTR}(k) + u_f(k) \quad (26)$$

4. 모의실험 결과 및 고찰

광 디스크를 이용한 모든 기기의 성능은 광 디스크 서보 시스템의 성능에 좌우된다. 특히, 외란 및 광디스크의 불량도에 따라 서보기능은 더욱 중요한 기능을 담당해야한다. 제안한 방법의 제어성능을 검증하기 위해서 모의실험을 통해 기존에 피드백 제어기인 LQG/LTR 제어기와 비교, 평가한다. 모의실험을 위하여 Sankyo SPU 3131 광픽업모델의 사양을 이용하였다. 픽업장치의 대물렌즈의 질량은 0.6 g이다. 전기회로계에서 저항 R 은 5.3 Ω 이고, L 은 84.3 μH 이다.

이때, 포커스 서보시스템의 전달함수를 구하면 다음 식과 같이 3차로 표현된다.

$$G(s) = \frac{992200000}{(s^2 + 13s + 15791)(s + 62832)} \quad (27)$$

Fig. 8은 플랜트의 주파수특성을 나타낸다. 1차 공진 주파수는 20 Hz이고, 최대 게인은 16.7dB이다. 포커스 서보 제어기를 설계하기 위해서 먼저 제어기 설계사양이 정해져야 한다.

일반적으로 DVD에서는 포커스서보 제어기의 대역폭을 광 디스크의 규격 및 면진과 DVD배속을 고려하여 2kHz로 하기 때문에 본 연구에서도 이 사양으로 제어기를 설계한다. 이 때, 설계사양에 의해 플랜트의 2차 공진 주파수는 제어시스템의 대역폭을 벗어날 뿐 만 아니라 2차공진점의 값은 미소하기 때문에 고차항을 무시해서 제어기를 설계한

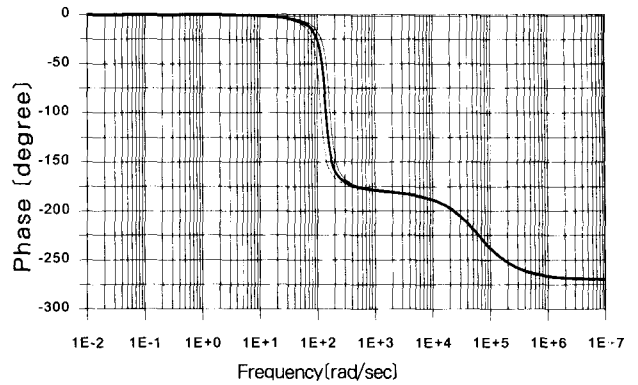
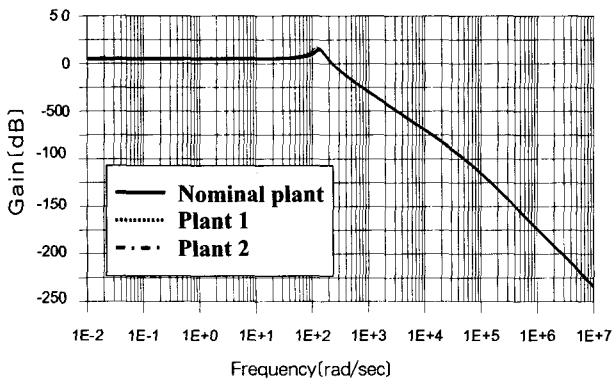


Fig. 8 Bode plot of the focus actuator of the optical disc drive

다. 먼저 피드포워드 제어기를 설계하면, 제어기의 전달함수 $K_f(z^{-1})$ 는 다음과 같다.

$$K_f(z^{-1}) = \frac{1 - 1.9995z^{-1} + 0.9995z^{-2}}{z^{-1}(0.2142 \times 10^{-5} + 0.2142 \times 10^{-5}z^{-1})} \quad (28)$$

피드포워드 제어기의 제어입력 $u_f(k)$ 는 식 (13)에서와 같이 구하면 다음과 같다.

$$u_f(k) = 466830 \hat{r}(k+1) - 933430 \hat{r}(k) + 466610 e(k-1) - u(k-1) \quad (29)$$

다음은 설계사양에 맞는 LQG/LTR 피드백 제어기를 설계한다. Fig. 9는 LQG/LTR 제어기의 목표필터루프(target filter loop : TFL)와 루프전달회복(loop transfer recovery : LTR)특성을 나타낸다. 여기서 설계된 제어기의 대역폭은 2kHz이고, 전달함수 $K_{LQG/LTR}(z^{-1})$ 는 다음과 같다.

$$K_{LQG/LTR}(z^{-1}) = \frac{(46707 + 42005z^{-1})z^{-1}}{(1 - 0.6418z^{-1} + 0.8311z^{-2})} \quad (30)$$

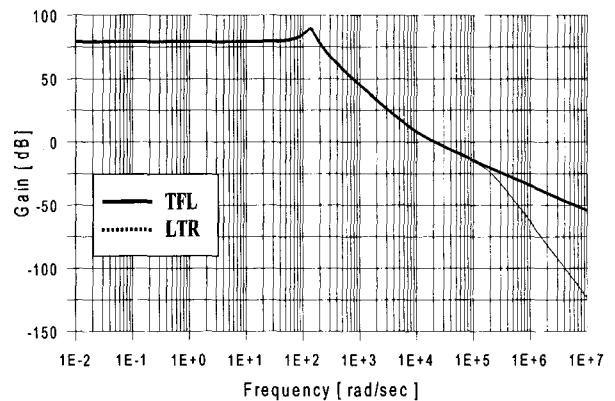


Fig. 9 Singular values of the loop transfer function

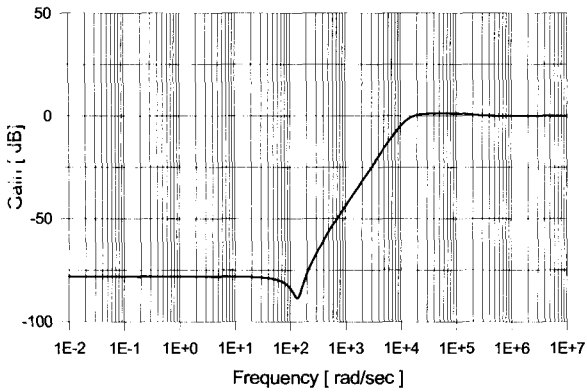


Fig. 10 Focus error frequency response function for LQG/LTR control system

피드백 제어기의 제어입력 $u_{LQG/LTR}(k)$ 는 식 (24)와 같이 구하면 다음과 같다.

$$u_{LQG/LTR}(k) = 46707e(k-1) + 42005e(k-2) + 0.6418u(k-1) - 0.8311u(k-2) \quad (31)$$

Fig. 10은 외란에 대한 LQG/LTR 제어기의 응답특성을 나타낸다. 100 rad/sec이하에서는 80 dB이상의 개선을 보이고 있고, 100 rad/sec~12 Krad/sec사이에서는 -26 dB/dec 이 기울기를 가짐을 알 수 있다. 광 디스크 면진변위의 크기는 저주파수에서 크고, 고 주파수에서 작기 때문에 DVD 포커스 서보사양을 만족한다.

Fig. 11은 모델링 오차에 대한 설계된 제어기의 안정도-강인성을 나타낸다. 플랜트 1은 1차 공진주파수가 16 Hz이고, 플랜트 2는 1차 공진주파수가 24 Hz이다. 그리고, 각각 최고 계인은 15 dB, 19 dB로 하였다.

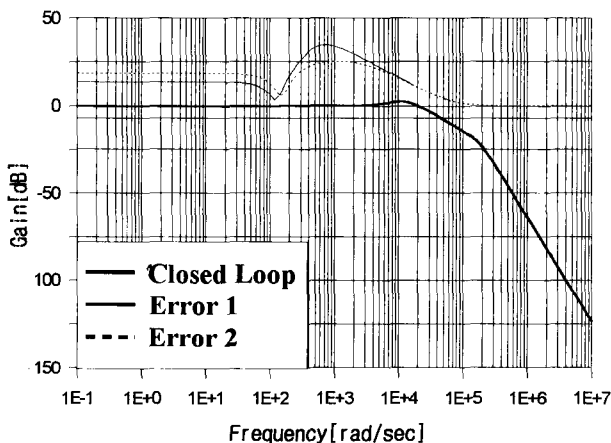


Fig. 11 Bode plots for the closed loop transfer function and modelling error with varying plants

본 연구에서, 제안한 포커스서보 시스템을 제어하는 제어입력은 피드포워드 제어력 $u_f(k)$ 와 피드백 제어력 $u_{LQG/LTR}(k)$ 를 합한 $u(k)$ 값이다. 모의실험을 위해서 Fig. 12와 같은 외란을 인가하였다. 인가된 외란을 식으로 나타내면 다음과 같다.⁽¹³⁾

$$r(t) = 2 \times 10^{-3} \sin 94.25t + 1 \times 10^{-3} \sin 314t + 3 \times 10^{-4} \sin 541t + 1 \times 10^{-4} \sin 3140t \quad (32)$$

Fig. 13은 설계된 플랜트를 대상으로 제어된 플랜트의 포커스오차를 나타내고 있다. 공칭 플랜트와 실제 플랜트 사이에 모델링 오차가 없으면 포커스오차는 0에 수렴함을 알 수 있다 LQG/LTR 제어기만을 적용했을 때는 포커스 오차의 RMS값이 4.2×10^{-6} m을 알 수 있다.

Fig. 14는 플랜트 1에 대한 포커스오차를 나타낸다. 제안된 제어기의 포커스오차는 RMS값이 2.43×10^{-7} m인데 반하여 기존 LQG/LTR 제어기는 4.86×10^{-6} m 임을 알 수 있다.

Fig. 15는 플랜트 2에 대한 포커스오차를 나타낸다. 제안된 제어기의 포커스오차는 RMS 값이 2.48×10^{-7} m인데 반하여 LQG/LTR 제어기는 4.85×10^{-6} m임을 알 수 있다.

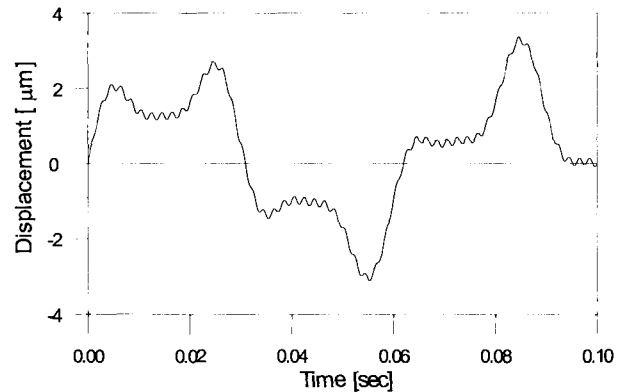


Fig. 12 Disturbance input profile

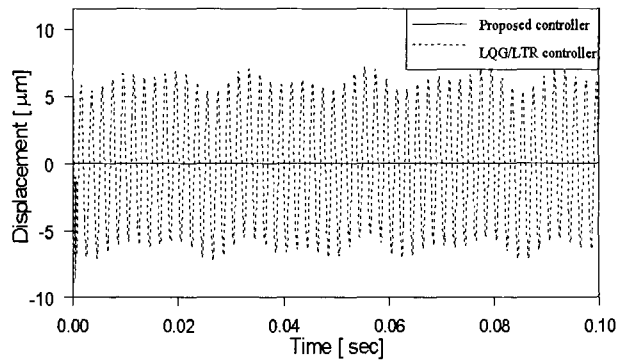


Fig. 13 Focus error in the nominal plant

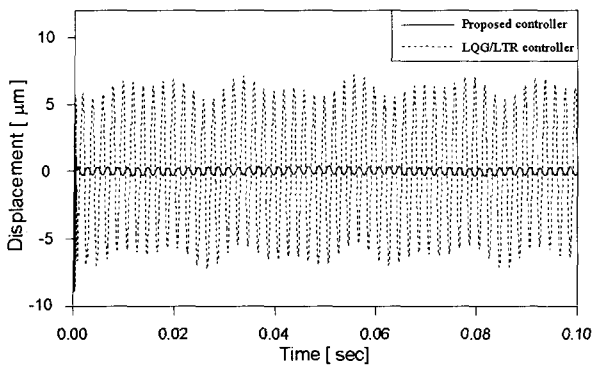


Fig. 14 Focus error in the plant 1

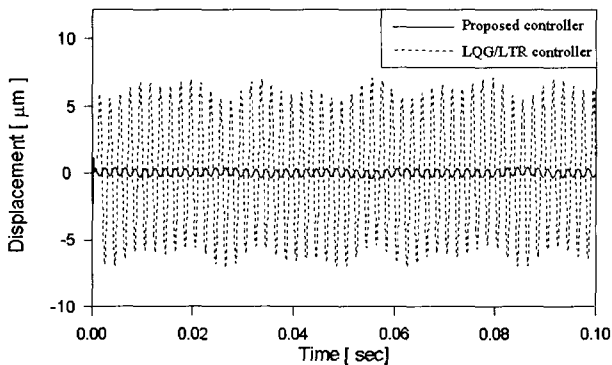


Fig. 15 Focus error in the plant 2

이들 결과에서 기존 LQG/LTR 제어기는 포커스오차를 줄이는 데에는 한계가 있지만, 제안한 방법은 포커스오차를 줄이는 데는 성능이 뛰어난 것을 알 수 있다. 특히 모델링 오차가 없을 때는 포커싱은 매우 양호하다. 그러나, 정의된 플랜트는 외란을 제어기 기준입력으로 이용하고 있기 때문에 외란을 간접적인 방법으로 추정해야하는 단점을 가지므로 모델링 오차에 성능이 좌우된다. 또한 대부분 생산되는 광 디스크를 제어하는 DSP칩은 빠른 실시간을 요구하기 때문에 하드와이어(hardwired)인 경우가 많다. 따라서 제품에 적용시 문제점으로는 새로운 포맷을 갖는 형태의 하드와이어 DSP칩 개발이 필요로 한다.

5. 결 론

본 연구에서는 광 디스크 드라이브의 서보시스템 제어기 설계를 위하여 기존의 제어대상플랜트 모델에서 외란으로 취급하던 디스크 먼진과 구동기의 베이스로부터 전달되는 진동을 기준 입력으로 하고 구동기의 대물렌즈의 위치를 제어함으로써 포커스오차를 줄이는 개념의 새로운 제어대상플랜트 모델을 제안 했다. 또한 제안한 플랜트 모델링과 기존 모델링 방법을 병용하여 LQG/LTR 피드백 제어와

역동학을 이용한 피드포워드 제어를 동시에 적용함으로써, 기존 포커스 서보방법에 비하여 포커스서보 성능을 크게 개선시켰다. 앞으로 디스크 먼진과 구동기의 베이스로부터 전달되는 진동을 보다 정확하게 관측할 수 있도록 구동기의 동역학 모델의 정확성을 높이는 과제가 남아있다.

참 고 문 헌

- (1) 長澤雅浩, 1997, "DVD 特集号によせて," National Technical Report, 特集/DVD, pp. 221~222.
- (2) Abedor, J., Nagapal, K., Khargonekar, P. P. and K. Poolla, 1995, "Robust Regulation in the Presence of Norm-Bounded Uncertainty," IEEE Trans. Automatic Control, Vol. 40, No. 1, pp. 147~152.
- (3) Kuo, B. C., 1987, Automatic Control Systems, Prentice-Hall.
- (4) 이문노, 문정호, 정명진, 1998, "광 디스크 드라이브의 트랙킹 서보시스템을 위한 다목적 강인 제어기의 설계," 제어·자동화·시스템공학논문집, 제 4권, 제 5호, pp. 592~599.
- (5) 尾上夫, 1988, "光 ディスク 技術," ラゾオ技術社, pp. 56~58.
- (6) 角田義人, 1994, "光ディスクストレージの基礎と應用," 電子情報通信學會, pp. 59~96.
- (7) Clements, K., 1993, Understanding and Servicing CD Players, Newness.
- (8) 한국영상기기연구조합, 1998, 디지털 VDR 기술개발 Workshop.
- (9) 김정태, 한기봉, 1997, "가변하중을 갖는 편로드 유압실린더의 운동제어를 위한 최적 자기동조제어," 대한기계학회 1997년도 추계학술대회논문집(A), pp. 846~852.
- (10) Bobrow, J. E., Lum, K., 1995, "Adaptive High Bandwidth Control of a Hydraulic Actuator," Proceedings of the American Control Conference, Washington, pp. 71~75.
- (11) 한기봉, 이시복, 1995, "차량 능동현가장치의 성능향상을 위한 복합제어기설계," 한국정밀공학학회논문집, 제 12권, 제 7호, pp. 74~82.
- (12) Maciejowski, J. M., 1991, "Multi-Variable Feedback Design," Addison Wesley.
- (13) Ohnishi, K., 1987, "A New Servo Method in Mechatronics", Trans. Japanese Soc. Elect., Vol. 107-D, pp. 83~86.