

광 픽업 장치의 H_∞ 위치 서보제어

°임 승철*, 김 윤 영**

H_∞ Position Servo Control of Optical Pick-Ups

°Seungchul Lim*, Yoon Young Kim**

ABSTRACT

Recently, high speed optical disk drives are increasingly demanded to read or write data fastly enough. To this end, both structure and controller designs of their optical pick-ups should be improved concurrently. In this paper, the pick-up during auto-focusing motion is mathematically modelled retaining all its peculiar features. The model turns out a linear time invariant system suitable for a control design method named H_∞ , which ensures robust stability in the presence of system uncertainties. Numerical simulation are performed to demonstrate the controller robustness with appropriate performance specifications being satisfied.

1. 서론

최근 고기능의 멀티 미디어 컴퓨터가 등장하게 됨에 따라, 광 디스크 드라이브가 오디오나 비디오 전용 플레이어에서 뿐만 아니라 컴퓨터용 CD-ROM 드라이브로도 각광받고 있다.

CD-ROM 드라이브는 현재 4배속 제품이 주종이나 6배속, 8배속 제품도 출시되고 있고 이러한 고속화 추세가 더욱 가속되기 위해서는 구조와 제어기 설계를 통합한 시스템 기술의 혁신이 요구된다.

따라서 본 연구에서는 CD-ROM 드라이브의 주요 부품인 광 픽업장치의 동특성을 파악하기 위한 모델링과 서보 제어기 설계 방법을 제시함으로써 향후 더욱 고속화 될 CD-ROM 드라이브의 개발에 도움을 주고자 한다.

CD-ROM 드라이브는 고속 검색에 유리한 직선형 트랙킹 판스프링 지지 타입의 경우 Fig.1과 같은 광픽업 장치가 들어 있으며 드라이브의 정상기능을 위하여 총 5개의 서보 장치가 있다⁽¹⁾.

그 중 가장 고속화에 문제가 되는 서보계는 디스크의 가공 오차, 착탈시 오차 및 회전시 진동에도 불구하고 대물렌즈의 초점을 디스크의 피트 반

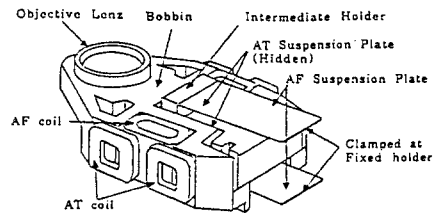


Fig.1 Optical Pick-Up

사면에 일치시켜 주는 자동 초점(이하 AF) 서보와 나선형 트랙위에 대물렌즈를 정확히 위치시키기 위한 자동 트랙킹(이하 AT) 서보이다.

AF나 AT 서보계는 공히 작은 전자기력으로 보빈을 움직이기 위하여 불가피하게 유연 구조가 된 지지계의 위치 제어 시스템으로서 다만 운동방향이 각각 디스크 회전면과 직교 혹은 평행 방향이라는 차이 뿐이므로, 문헌⁽²⁾에서 지적한 대로 픽업의 구조설계와 액츄에이터 구동력의 독립성을 통하여 그들간의 간섭을 무시할 수 있다면 상호 동일한 문제가 된다. 따라서 본 논문에서는 AF 서보계만을 다루고자 한다.

* 명지대학교 기계공학과

** 서울대학교 기계설계학과

2. 시스템 방정식

2.1 광 픽업 장치의 운동방정식

보빈의 지지방식은 제조사마다 다소간의 차이를 보이고는 있으나, 대체적으로 Fig.1과 같이 유연한 2개이상의 보를 평행 사변형 구조가 되도록 연결하여 보빈의 운동방향이 고정 홀더와 평행한 병진운동만 일어나도록 설계되었으며 댐핑증가를 위하여 판에 점탄성 댐핑재를 도포한다.

따라서 본 논문에서는 Fig.1과 같은 전형적인 경우를 이상화 시킨 후 그의 운동방정식을 구하고자 한다. 즉, Fig.2와 같이 픽업의 보빈을 2개의 AF 지지판이 양쪽에서 좌우 대칭으로 지지하는 것으로 보고 보빈의 중심선을 기준으로 좌편만을 모델링시 고려한다.

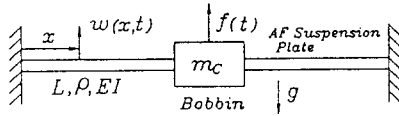


Fig.2 Idealized Model

AF방향에서만 볼 때 지지판은 등가 강성을 갖고 우측단의 회전이 구속된 Euler-Bernoulli 외팔보로 간주할 수 있으며, 복잡한 형상의 보빈은 상대적으로 고주파에서만 진동 모드가 발생하므로⁽²⁾ 질량만을 갖는 강체로 간주한다. 이 때 전자석 액츄에이터와 레이저 광학계를 이용한 센서 1쌍은 모든 CD-ROM 드라이브에서와 같이 보빈의 위치와 동일 장소에 설치되었다고 본다.

이와 같이 경계조건을 알고 있는 구조물의 운동방정식을 해석적으로 구하기 위하여 확장 Hamilton 원리⁽³⁾를 적용한다. 우선 보의 운동에너지 T 를 구하면 식(1)과 같다.

$$T = \frac{1}{2} \rho \int_0^L \dot{w}^2(x, t) dx + \frac{1}{2} m_c \dot{w}^2(L, t) \quad (1)$$

여기서, ρ , L , m_c , $w(x, t)$ 는 각각 보의 단위길이당 질량, 보의 길이, 보빈의 질량, 보의 정적평형상태로부터의 횡변위를 의미한다. 한편 정적 평형상태를 기준으로 구한 위치에너지는 다만 굽힘 변형에너지로서 식(2)와 같다.

$$V = \frac{1}{2} EI \int_0^L w''^2(x, t) dx \quad (2)$$

여기서 EI 는 보의 굽힘강성이다. 또한 가상일은 비보존력 f 에 의하여 다음과 같이 구해진다.

$$\delta \bar{W} = f \delta w(L, t) \quad (3)$$

식(1)~(3)을 확장 Hamilton원리의 공식(4)에 대입하여

$$\int_{t_1}^{t_2} [\delta(T - V) + \delta \bar{W}] dt = 0 \quad (4a)$$

$$\delta w(x, t_1) = \delta w(x, t_2) = 0 \quad (4b)$$

변분개념과 경계조건을 고려하여 부분적분을 수행하면 식(5)와 같은 편미방과 경계조건을 얻는다.

$$\rho \ddot{w}(x, t) + EI w''''(x, t) = 0 \quad (5a)$$

$$w(0, t) = w'(0, t) = w'(L, t) = 0 \quad (5b, c, d)$$

$$EI w''''(L, t) - m_c \ddot{w}(L, t) + f(t) = 0 \quad (5e)$$

식(5)의 경계치 문제는 식(5e)로 인하여 비제차(nonhomogeneous)경계조건을 갖는 특징을 갖는다. 이와 같은 경우, 변수분리법으로 편미방을 풀기 위하여 임의 함수 $h(x)$ 를 다음과 같이 도입하여

$$w(x, t) = v(x, t) - h(x)f(t) \quad (6)$$

든 경계조건이 제차가 되도록 문제를 변환시킬 수 있다⁽³⁾. 식(6)을 식(5b)~(5e)에 대입하면 $h(x)$ 가 만족시켜야 하는 일련의 조건을 얻을 수 있고, 가능한 u 와 v 의 차이를 작게 하면서도 그 조건들을 만족시키는 $h(x)$ 를 구하면 식(7)과 같다.

$$h(x) = \frac{1}{EI} \left[\frac{x^3 - (L-\epsilon)^3}{6} - \frac{(L-\epsilon)^2(x - (L-\epsilon))}{2} - \frac{(L-\epsilon)(x^2 - (L-\epsilon)^2)}{2} + (L-\epsilon)^2(x - (L-\epsilon)) \right] \mu(x - (L-\epsilon)) \quad (7)$$

여기서 ϵ 과 $\mu(x)$ 는 각각 매우 작은 양수 값과 단위계단 함수를 나타낸다.

따라서 원래의 u 에 관한 경계치 문제 식(5)는 v 에 관한 경계치 문제 식(8)로 변환된다.

$$\rho \dot{v}(x, t) + EI v''''(x, t) = \rho h(x) \dot{f}(t) + EI h''''(x) f(t) \quad (8a)$$

$$v(0, t) = v'(0, t) = v'(L, t) = 0 \quad (8b, c, d)$$

$$EIv''''(L, t) - m_c \dot{v}(L, t) = 0 \quad (8e)$$

식(8)의 경우 제차해를 구하기 위하여 $v(x, t)$ 를 공간함수 $V(x)$ 와 시간함수 $\eta(t)$ 의 곱으로 보고 식(8)에 대입하면 다음과 같은 고유치 문제를 얻는다.

$$EIV''''(x) = \rho\omega^2 V(x) \quad (9a)$$

$$V(0) = V'(0) = V'(L) = 0 \quad (9b, c, d)$$

$$EIV''(L) = -m_c \omega^2 V(L) \quad (9e)$$

여기서 ω 는 동기운동의 각고유주파수를 뜻한다.

식(9)로부터 특성방정식과 해 $V(x)$ 를 각각 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\frac{m_c \gamma}{\rho L} (1 - \cos \gamma \cosh \gamma) - \cos \gamma \sinh \gamma - \cos \gamma \sinh \gamma - \sin \gamma \cosh \gamma = 0 \quad (10)$$

$$V_i(x) = c_i \left[\sin \beta_i x + \left(\frac{\cos \beta_i L - \cosh \beta_i L}{\sin \beta_i L + \sinh \beta_i L} \right) \cos \beta_i x - \sinh \beta_i x + \left(\frac{\cos \beta_i L - \cosh \beta_i L}{\sin \beta_i L + \sinh \beta_i L} \right) \cosh \beta_i x \right], \quad i = 1, 2, \dots \quad (11)$$

식(10)에서 $\gamma = \beta L$, $\beta^4 = \rho\omega^2/EI$ 이고 식(11)에서 c_i 는 i 번째 진동모드의 스케일 계수로서 다음과 같은 정규화(normalization)과정을 통하여 결정될 수 있다.

식(8)은 선형이므로 제차해의 경우 중첩의 원리가 성립하고 따라서 원칙적으로 무한개 모드의 합으로 표현되어야 하지만 모델의 간략화를 위하여 처음 몇개의 모드만으로 다음과 같이 근사화시킬 수 있다.

$$v(x, t) \cong \underline{v}^T(x) \underline{\eta}(t) \quad (12)$$

여기서 밑줄은 벡터표시로서 \underline{v} 는 V_i 를 i 번째 요소로 갖는 벡터이고 상첨자 T 는 transpose 표시이다. 식(12)를 (8a)와(8e)에 대입하면 식(13)을 얻는다.

$$\rho \underline{v}^T(x) \ddot{\underline{\eta}}(t) + EI \underline{v}''''^T(x) \underline{\eta}(t) = \rho h(x) \dot{f}(t) + EI h''''(x) f(t) \quad (13a)$$

$$EI \underline{v}''(L)^T \underline{\eta}(t) = m_c \underline{v}^T(L) \dot{\underline{\eta}}(t) \quad (13b)$$

한편, 식(9)의 고유치 문제는 대칭성(self-adjointness)을 갖고 있어 진동수가 서로 다른 모드의 고유함수간에는 아래와 같은 직교성이 존재함을 알 수 있다.

$$\int_0^L \underline{v}(x) \rho \underline{v}^T(x) dx + \underline{v}(L) m_c \underline{v}^T(L) = M \quad (14)$$

여기서 M 은 positive definite한 대각의 질량행렬이며 이를 항등행렬로 만들도록 모든 c_i 를 결정하게 되면 식(9a), (9e), (14)로부터 다음의 결과를 얻을 수 있다.

$$\int_0^L EI \underline{v} \underline{v}''''^T(x) dx - EI \underline{v}(L) \underline{v}''^T(L) = \Lambda \quad (15)$$

여기서 Λ 는 각 모드의 고유치 즉 ω_i^2 를 i 번째 요소로 갖는 대각행렬이다.

식(14)와 (15)를 참작할 때, 식(13)으로부터 다음과 같이 상호 분리된 모드방정식을 얻을 수 있다.

$$\ddot{\underline{\eta}}(t) + \Lambda \underline{\eta}(t) = \underline{H} \dot{f}(t) + \underline{H}^* f(t) \quad (16)$$

여기서

$$\underline{H} = \rho \int_0^L \underline{v}(x) h(x) dx, \quad \underline{H}^* = EI \int_0^L \underline{v}(x) h''''(x) dx$$

이다.

한편, 지지보의 구조적 댐핑은 일반적으로 모델링이 곤란하므로 선형 모드 점성댐핑으로 등가시켜 고려하면 식(16)은 다음과 같이 진다.

$$\ddot{\underline{\eta}}(t) + \underline{E} \dot{\underline{\eta}}(t) + \Lambda \underline{\eta}(t) = \underline{H} \dot{f}(t) + \underline{H}^* f(t) \quad (17)$$

여기서 $\underline{E} = \text{diag}[2\zeta_1\omega_1, 2\zeta_2\omega_2, \dots]$ 이며 ζ_i 는 i 번째 모드의 감쇠율이다.

따라서, 보빈의 횡변위 $w(L, t)$ 는 식(6), (7), (12)와 \underline{H} , \underline{H}^* 의 정의로부터 다음과 같이 근사화된다.

$$w(L, t) \cong \underline{v}^T(L) \underline{\eta}(t) \quad (18)$$

여기서 $\underline{\eta}(t)$ 는, 실제 보빈은 2개의 보로 지지되어 있으므로 지금까지 고려한 질량과 강성을 모두 2

배로 환원시켜야 함에 따라 식(17)로부터 얻어지는 식(20)을 만족시키는 변수이다.

$$\ddot{y}(t) + E\dot{y}(t) + Ay(t) = \frac{1}{2} H^* f(t) \quad (19)$$

2.2 상태 공간 방정식

제어기 설계의 기본이 되는 보빈의 변위 모델을 위하여 2차 진동모드까지만 고려하기로 한다. 4장에서 알 수 있지만 그러한 모델축소에 따른 오차는 무시 가능하다.

한편, 광픽업 장치의 서보계는 Fig.3과 같은 블록선도로 이루어 지므로

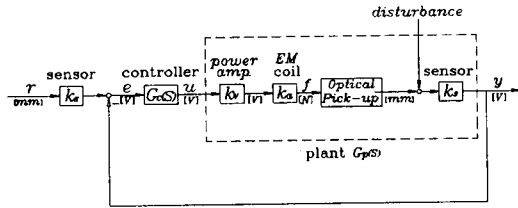


Fig.3 Block Diagram of AF Servo System

제어입력 u 를 전력증폭기의 입력전압, 상태변수를 $x = [\eta_1 \quad \dot{\eta}_1 \quad \eta_2 \quad \dot{\eta}_2]^T$, 그리고 출력 y 를 변위 센서의 출력전압으로 정의하였을 때 플랜트의 상태 방정식은 식(19)로부터 다음과 같아 진다.

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad y = Cx \quad (20a, b)$$

여기서,

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\omega_1^2 & -2\zeta_1\omega_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -\omega_2^2 & -2\zeta_2\omega_2 \end{bmatrix},$$

$$B = k_a k_v 10^3 [0 \quad v_1(L) \quad 0 \quad v_2(L)]^T / 2,$$

$C = k_s [v_1(L) \quad 0 \quad v_2(L) \quad 0]$ 이며 k_s 는 변위센서의 이득 [V/mm], k_v 는 전력증폭기의 전압이득 [V/V], k_a 는 전자석의 이득 [N/V]이다.

3. H_∞ 제어기 설계

제어기 설계에 앞서 식(20)으로부터 플랜트의

전달함수를 구한 후, 극점과 영점의 위치를 조사하여 보면 극점과 영점이 s 평면의 허수축상에 번갈아 존재한다. 따라서 비례제어시 시스템이 항상 점근적으로 안정할 것임을 알 수 있으나, 오버슈트와 세팅 시간이 과도함으로 인하여 유용성이 전혀 없을 수 있다.

따라서 고속 광디스크 장치에 적합한 다음과 같은 요구사항을 제시하고 이를 만족시키는 제어기를 설계한다.

제어 요구사항:

- 주파수 ω_1 까지 외란감쇄율(정상상태 오차) 1% 이내
- 주파수 ω_2 정도의 페루프 대역폭 확보
- 최대한의 강인 안정성 및 성능 확보

위의 사양을 만족시키기 위하여 다양한 제어기 설계기법을 고려할 수 있으나, 현재의 광 디스크 드라이브 장치는 대물렌즈와 레이저 광학계 한 세트만으로 데이터를 읽어 내는 동시에 AF 및 AT 서보용 위치 오차를 검출하고 있기 때문에, 제어루프상 접근할 수 있는 시스템 정보는 오직 피드포부터 대물렌즈까지의 간격 즉 위치오차 신호뿐임을 주목해야 한다.

따라서, 시스템의 출력 y 를 이용하여 상태변수를 관측해야 하는 대부분의 현대제어 기법의 적용이 불가능하다. 이것이 광픽업 장치에서 소위 고전적인 PID제어방법이 현재 다용되고 있는 이유중의 하나로 사료된다.

그러나, PID제어 설계법은 기본적으로 시행착오적 반복기법이므로 그 단점을 개선하기 위하여 본 논문에서는 강인 제어방법중의 하나인 H_∞ 제어⁽⁴⁾를 적용하고자 한다. H_∞ 제어는 특이치의 H_∞ norm을 이용하여 주파수 영역에서 루프전달함수를 shaping하는 다변수 문제에서 주로 크게 효과를 보이고 있지만, 본 연구대상에서와 같이 선형 시불변이며 단일 입출력인 문제에도 적용이 매우 적합하며 설계 절차가 거의 일회적으로 처리되는 장점도 지닌다.

전술한 요구사항을 만족시키는 H_∞ 제어기를 설계하기 위하여 다음과 같이, 외란으로부터 출력 또는 기준입력으로 부터 오차까지의 전달함수인 감도 S 와 기준입력으로 부터 출력까지의 전달함수

인 보(complementary)감도 T 로 이루어진 혼합 감도의 최소화문제를 다음과 같이 제시한다.

$$\left\| \begin{bmatrix} W_1 S \\ W_3 T \end{bmatrix} \right\|_{\infty} < 1 \quad (21)$$

여기서, $\| \cdot \|_{\infty}$ 는 H_{∞} norm을 표시하며 W_1 과 W_3 는 각각 감도와 보감도의 가중 함수로서 원하는 제어기 설계를 위하여 요구사항에 따라 적절히 주파수대역에서 정의되어야 한다. 따라서, 가중 함수들을 다음과 같이 정의한다.

$$W_1^{-1} = \frac{(\frac{s}{w_1} + 1)^2}{10^2(\frac{s}{w_2} + 1)^2}, \quad W_3^{-1} = \frac{w_3^2}{s^2} \quad (22a, b)$$

여기서 w_1, w_2, w_3 는 각 가중치 함수의 corner 주파수이다. 식(21)과 (22)가 주어지면 문헌⁽⁴⁾의 방법대로 일련의 과정을 거쳐 귀환제어기를 설계할 수 있다.

4. 수치 시뮬레이션

시스템의 각 파라미터를 실제 픽업장치에 가깝도록, 지지판의 재질은 압연 알루미늄이며 단면은 구형으로 균일하다고 보고 다음과 같이 지정한다.

$$L = 1.5 \times 10^{-2} \text{m}, \quad b = 4.0 \times 10^{-3} \text{m},$$

$$t = 5 \times 10^{-5} \text{m}, \quad m_c = 5 \times 10^{-4} \text{kg}$$

이 경우, 식(10)의 계수로서 보빈 대 지지보의 질량비인 $m_c/\rho L$ 은 61728.4가 되며, 식(10)의 해는 고유진동수로 환산시 각각 142.61, 228840.7, 630809.2 r/s 등이다. 식(11)로부터 정규화된 해당 초기 모드들의 형상을 구하여 도시하면 Fig.4와 같이 2차이상 모드의 경우 보빈위치에서의 변위가 거의 0이 됨을 알 수 있었다.

따라서 문헌⁽⁵⁾에서 지적한 대로 픽업장치의 설계시, 질량비의 조정에 의하여 단일 입출력 제어 성능에 악 영향을 미치는 2차 이상 모드의 제거가 댐핑처리 없이도 가능함과, 1차모드까지만 고려해도 모델링 오차는 무시될 수 있음을 알 수 있다.

한편 각 모드의 감쇠율을 공히 0.1, Fig.3의 각

이득을 $k_s=1, k_a=0.02, k_v=100$ 으로 하는 경우, 식(21)로부터 주파수 응답함수(이하 FRF)를 구해보면 Fig.5와 같다.

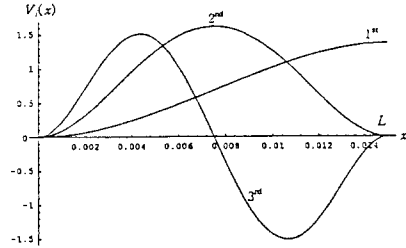


Fig.4 Vibrational Mode Shapes

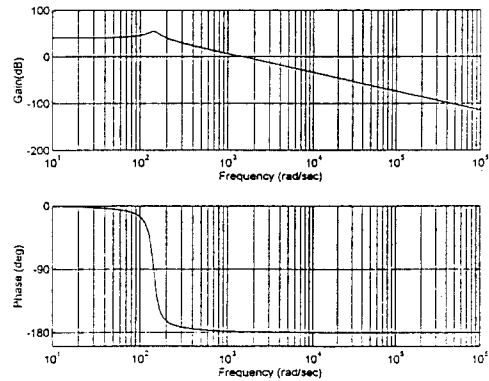


Fig.5 FRF of the Plant

제어기의 설계를 위하여 가중함수의 corner 주파수 w_1, w_2, w_3 를 각각 $10^4, 10^6, 10^6$ r/s로 정하였을 때 설계된 H_{∞} 제어기의 차수는 5차이며 그의 FRF는 Fig.6과 같다.

이 경우, 보상기를 포함한 루프 전달함수로부터 이득여유와 위상여유는 각각 ∞ dB와 43.5° 이며, 페루프 전달함수의 FRF로부터 차단주파수 약 10^6 r/s 까지 이득이 거의 1이고 위상차가 0이 됨을 알 수 있었다. 이것은 단위계단 시간응답인 Fig.7의 실선으로 부터 세트링 시간이 약 0.02 ms이며 정상상태 오차가 거의 없는 것($0.7 \mu\text{m}$)으로도 확인된다.

그러나, 실제 픽업장치는 AF동작시 댐핑값의 오차, 조립 제작상의 오차, 그리고 보빈자체의 고주파 진동, AT 서보등 타 운동으로 부터의 간섭 등

의 문제로 불확실성을 항상 내포하고 있으므로, 그러한 경우에 대하여 시스템 안정성과 성능 저하를 점검할 필요가 있다.

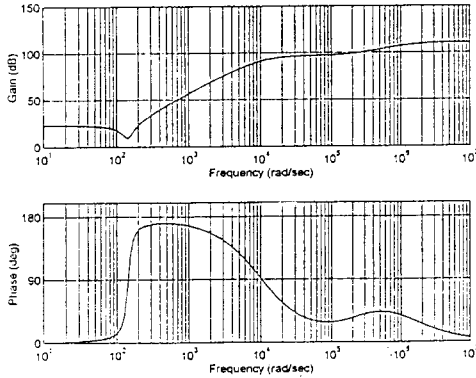


Fig.6 FRF of the Controller

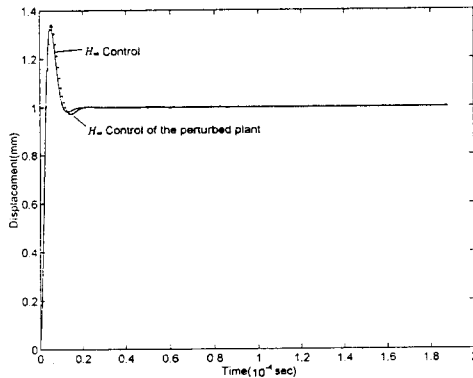


Fig.7 Unit Step Responses

예로서 문헌⁽²⁾에서 보인 바와 같이 1차 굽힘모드 다음에 비틀림 모드가 나타나는 경우에 대비하여 설계된 제어기를 Fig.8와 같이 극점/영점순의 2차공진이 발생하도록 변경된 섭동 플랜트에 적용시켜 본다. 이 때의 제어성능을 단위계단 시간응답으로 보이면 Fig.7의 점선과 같으므로, 본 서보 시스템의 강인 안정성과 성능을 알 수 있다.

5. 결론

이상의 결과로부터 광 디스크 드라이브의 고속화를 위한 픽업장치에 관하여 다음과 같은 결론을 제시할 수 있다.

구조설계시 직교 운동 방향간의 간섭이 최소화 되도록 픽업의 무게중심과 구동력의 위치를 일치시키고, 보빈대 지지보의 질량비를 가능한 크게 하여 지지판에 의한 부차 굽힘진동의 발생을 막는다.

보빈자체의 진동 혹은 기타 간섭 운동의 효과를 최소화하기 위하여 지지보에 댐핑처리를 충분히 하되 그럼에도 잔류하는 2차이상 부차진동등의 시스템의 불확실성은, 그의 주파수 대역을 파악하고 적절한 가중치 함수를 정의함에 따라 H_∞ 제어기를 설계하므로써 그 영향을 최소화 할 수 있다.

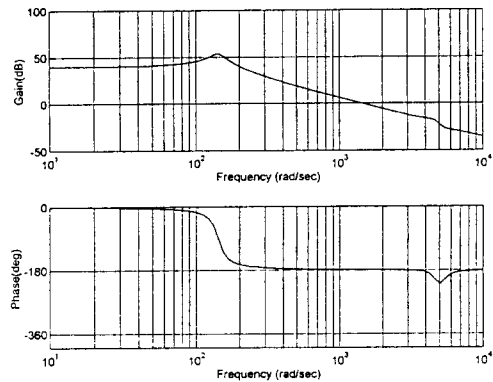


Fig.8 FRF of the Perturbed Plant

참고 문헌

- [1] 서동필, 콤팩트 디스크와 플레이어, 동신 출판사, 1990.
- [2] 임경화, 이용훈, 김석중, 이재원, "고밀도 광픽업의 ACTUATOR동특성", 한국 소음진동 공학회 1995년도 춘계학술대회논문집, pp.258-263, Apr. 1995.
- [3] L.Meirovitch, *Analytical Methods in Vibrations*, Macmillan, 1967.
- [4] J.Doyle, K.Glover, P.Khargonekar, and B.Francis, "State-space solutions to standard H^2 and H^∞ control problems", IEEE Trans. Automat. Contr., AC-34, no. 8, pp. 831-847, Aug. 1989.
- [5] 김운영, 이호철, "액츄에이터 설계를 위한 단순보 모델 진동해석", 한국 소음진동 공학회 1995년도 추계학술대회논문집, pp.167-171, Nov. 1995.