

디스크 드라이브용 VCM 액추에이터의 전력 소모와 감도비에 관한 연구

Power Consumption and Sensitivity ratio of VCM-type Actuator for Disk Drive

김 선 모* · 윤 진 욱† · 장 동 섭*

Sun Mo Kim, Jinwook Yoon and Dong Seob Jang

(2004년 10월 23일 접수 : 2004년 11월 12일 심사완료)

Key Words : VCM-type Actuator(VCM 액추에이터), Power Consumption(전력 소모), Sensitivity Ratio(감도비)

ABSTRACT

In this paper, the explicit equations on the power consumption and sensitivity ratio of VCM-type actuator for disk drive are proposed. The power consumption and sensitivity ratio is derived in frequency domain. The power consumption during the track following of the actuator can be described well in frequency domain and it can be used to calculate the total power dissipation of the actuator which is needed to compensate the tracking and focusing errors. Also, the sensitivity ratio of an actuator is derived by using the reference servo of a disk drive and will be used to optimally obtain the performances of the actuator. This sensitivity ratio can persuasively explain the basis of the target performances of the actuator in the considerations of the reference servo. The usefulness of the proposed equations for the sensitivity ratio and power consumption of an actuator is shown by a lot of simulations. In the near future, we will verify the simulation results by experiments.

1. 서 론

광디스크, 하드디스크 드라이브에 사용되는 선형 또는 회전형 구동기의 설계에 있어서, 중요한 요구사항중의 하나는 탐색 시간의 최소화이다. Seek time을 짧게 하기 위해서는 구동기의 무게와 크기가 작아져야 할 뿐만 아니라 큰 구동력과 높은 고유진동 주파수도 요구된다. 이러한 요구를 만족시키기 위해서 구동기의 설계 및 제어에 관련된 많은 연구가 수행되었다.⁽¹⁻⁵⁾

탐색 시간뿐만 아니라 동 특성도 구동기의 설계에 있어서 중요한 요구 사항이다. 이러한 구동기의 성능

은 서보 대역과 데이터 전송속도에 큰 영향을 미치며, 구동기의 DC/AC 감도, 고차 공진 주파수, 감쇠 특성 등이 이에 포함된다. 이러한 구동기의 성능에 관련된 연구로써, 광디스크를 위한 2축 구동기의 최적 성능 치를 얻기 위한 연구가 있었으며,⁽⁴⁾ 광 픽업 구동기의 최적설계와 다구찌 방법을 이용한 구동기의 설계에 대한 연구가 있었다.^(5,6) 그러나 이러한 설계 방법들은 단지 구동기의 구동력만을 크게 하여 설계한 경우거나, 성능에 대한 목표 치를 정하고 최적설계를 수행하더라도 목표 치에 대한 근거를 명확히 제시하지 않고 있다. 따라서 본 논문에서는 성능 목표치에 대한 근거로써 서보 제어의 개념을 도입하여 구동기의 감도비에 적용함으로써 이론적으로 조금 더 명확한 근거를 제시하고자 한다.

또한, 구동기의 파워 소모도 중요한 요소이며, 특히 모바일용에 적합한 작은 크기의 드라이브 개발에 있

† 책임저자 : 정희원, 삼성전자 디지털미디어연구소

E-mail : jinwook.yoon@samsung.com

Tel : (031) 200-3911, Fax : (031) 200-3195

* 삼성전자 디지털미디어연구소

어서는 결정적인 요인으로 작용할 수 있다. 이러한 파워 소모에 의한 열의 발생은 광학 부품과 구동기의 온도를 증가시키고 결국 성능을 저하시키는 원인으로 작용한다. 특히, 과도한 발열은 코일의 결합상태를 파괴할 수도 있다. 구동기의 파워 소모에 대한 기존 연구로는 탐색구동 시 발생하는 파워 소모에 대한 연구가 있었다. 그러나 구동기는 탐색구동뿐 아니라 트랙 추종을 위한 구동도 필요하다. 즉, 구동기는 디스크에 기록되어 있는 데이터를 읽고 쓰기 위하여 항상 트랙 추종을 하여야 하며, 이러한 구동 중에 발생하는 발열은 탐색구동 시 발생하는 발열에 비하여 작지 않다. 오히려 트랙 추종 시의 발열은 지속적으로 발생하는 양이므로 이러한 구동기의 동적구동 시 발생하는 파워소모에 대한 해석이 중요하게 된다.

이 논문에서는 구동기의 파워소모에 관련된 수학적 모델을 주파수 영역에서 유도하였다. 주파수 영역에서의 파워소모 해석은 구동기의 동적구동 시에 파워소모를 더욱 잘 설명해 줄 수 있다. 또한, 이전의 논문에서 구동기의 탐색시간 최소화에 대한 기법과 구동기의 목표 성능치를 달성하기 위한 최적설계 방법 등을 제시하였다.⁽⁷⁻¹²⁾ 그러나 이러한 논문에서는 목표 성능치에 대한 명확한 근거는 제시하지 못했다. 물론, 광디스크 드라이브의 경우 사용되는 서보 특성으로부터 유추하여 구동기의 성능치에 대한 한계 값을 주고는 있지만, 이러한 내용을 이론적으로 다룬 기존의 논문은 없었다. 따라서 본 논문에서는 광디스크 드라이브에서 적용하고 있는 일반적인 디스크 규격과 서보 규격을 이용하여 이러한 목표 성능치에 대한 근거를 제시하고 이를 최적설계에 적용한 예를 보일 것이다. SQP (sequential quadratic programming)이 구속조건을 갖는 최적설계 문제에 적당하기 때문에 이 논문에서는 최적설계를 위하여 이러한 SQP 기법을 사용하였다.

2. 구동기의 파워 소모와 감도비

2.1 구동기의 파워 소모

디스크 드라이브에 사용되는 구동기는 대부분 voice coil motor (VCM) 형식이고 선형 구동기와 회전 구동기의 이론적 전개는 유사하므로 여기서는 VCM 형식의 선형 구동기에 대해서만 다루기로 한다. 먼저 일반적인 선형 구동기의 구조는 Fig. 1(a)과 같고, 이러한 구조는 광디스크 드라이브의 미세 구동

기에서 찾아 볼 수 있다. Fig. 1(a)에서 보는 바와같이 미세 구동기는 포커싱, 트랙킹 방향으로 구동되는 2축 VCM으로 구성된다. 또한 Fig. 1(b)는 포커싱, 트랙킹 방향으로의 개략도를 나타낸다.

따라서, 이러한 선형 구동기의 지배방정식을 식 (1)과 같이 표현할 수 있다. 여기서, M , C , k , ϕ 는 각각 구동기의 전체 질량, 감쇠 상수, 스프링 상수에 의한 강성, 힘 상수를 나타내고 x , i 는 각각 구동기의 변위와 코일에 인가되는 전류를 나타낸다.

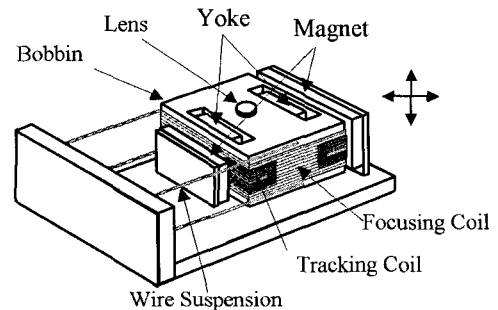
$$M\ddot{x} + C\dot{x} + kx = \phi \cdot i(t) \quad (1)$$

식 (1)을 라플라스 변환하여 전류 대 변위에 대한 식으로 표현하면 다음과 같다.

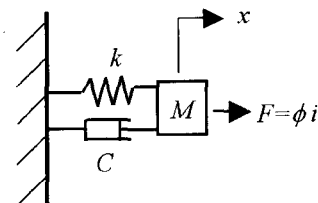
$$\frac{X(s)}{I(s)} = \frac{\phi}{Ms^2 + Cs + k} \quad (2)$$

식 (2)에 $s=j\omega$ 를 대입하고 $\frac{I}{X}(\omega)$ 의 크기를 구하면 아래 식과 같이 된다.

$$\left| \frac{I}{X}(\omega) \right| = \frac{((k - M\omega^2)^2 + C^2\omega^2)^{\frac{1}{2}}}{\phi} \quad (3)$$



(a) Structure of a linear VCM



(b) A schematic diagram for focusing/tracking motions

Fig. 1 A linear VCM for optical disc drive

따라서 식 (3)을 이용하여 파워소모량을 식 (4)와 같이 나타낼 수 있으며, 이것은 주파수 영역에서의 파워소모를 나타낸다. 즉, 낮은 주파수 영역에서는 스프링 상수(k)에 의한 파워소모량이 지배적이고 높은 주파수 영역에서는 구동부의 질량(M)에 의한 파워소모가 지배적이라는 것을 알 수 있다. 목표 트랙까지 고속 탐색을 하는 경우에는 고주파수 영역에 해당되므로 구동부의 질량과 탐색시간이 파워소모량에 가장 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

$$P(\omega) = I^2(\omega) \cdot R_c \\ = \frac{R_c}{\phi^2} \cdot \left\{ (k - M\omega^2)^2 + C^2\omega^2 \right\} \cdot X^2(\omega) \quad (4)$$

식 (4)에서, 코일의 저항(R_c)과 힘 상수는 아래 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$R_c = k_R \cdot \frac{Nl_t}{d_c^2} = k_R \cdot \frac{A_t l_t}{d_o^2 d_c^2} \\ \phi = 2Nl_e B_g = \frac{2B_g A_t l_e}{d_o^2} \quad (5) \\ N \cong \frac{A_t}{d_o^2}$$

여기서, k_R , N , l_t , l_e , d_c , d_o , A_t 등은 각각 비례 상수, 코일의 총 감긴 수, 1회 감긴 코일의 길이, 자기장 속에 놓여 있는 코일의 유효길이, 코일에서 도체부의 외경, 코일의 전체 외경, 감긴 코일이 형성하는 단면적 등을 나타내며 B_g 는 영구자석과 요크 사이의 자속 밀도를 의미한다. 식 (5)를 식 (4)에 대입하여 정리하면 최종적으로 파워소모를 식 (6)과 같이 얻을 수 있고 자세한 유도 과정은 부록 A에 나타내었다.

$$P(\omega) = \frac{k_R}{4B_g^2 a^2 V_c} \times \left(\frac{d_o}{d_c} \right)^2 \\ \times \left[\left\{ (k - M\omega^2)^2 + C^2\omega^2 \right\} \cdot X^2(\omega) \right] \quad (6)$$

또한, 디스크 드라이브 구동기가 디스크 상의 트랙을 추종하는 동안, 구동기의 구동 중심은 구동기의 정적 평형점으로부터 벗어 날 수 있다. 따라서 Fig. 2와 같이 구동 중심이 정적 평형점 X_{os} 만큼 벗어나

있다고 가정하면, 식 (6)은 식 (7)과 같이 표현된다.

$$P(\omega) = \frac{k_R}{4B_g^2 a^2 V_c} \times \left(\frac{d_o}{d_c} \right)^2 \\ \times \left[\left\{ (k - M\omega^2)^2 + C^2\omega^2 \right\} \cdot X^2(\omega) + k^2 \cdot X_{os}^2 \right] \quad (7)$$

또한, 식 (7)에서 M 을 $M_a + M_c$ 로 두고 다시 정리하면 식 (8)과 같이 된다.

$$P(\omega) = \frac{k_R D_c}{4B_g^2 a^2 M_c} \times \left(\frac{d_o}{d_c} \right)^2 \\ \times \left[\left\{ (k - (M_a + M_c)\omega^2)^2 + C^2\omega^2 \right\} \cdot X^2(\omega) + k^2 \cdot X_{os}^2 \right] \quad (8)$$

여기서, M_a , M_c , D_c 는 Fig.1(a)에서 보는 바와 같이 각각 코일부를 제외한 보빈부의 질량, 코일부의 질량, 코일의 밀도를 나타내고, $X(\omega)$, X_{os} 는 디스크의 진동량, 구동 중심의 초기 위치에 따라서 결정되는 양이다. 여기서, 보빈부 질량(M_a)의 경우에는 설계 초기 시 드라이브의 전체 크기, 영구자석과 요크로 이루어진 자기회로부의 형상과 치수 등에 의해서 원하는 보빈부의 형상과 치수가 대략적으로 결정되고, 그 후에 구동기의 서보대역내에 보빈부의 고차공진 주파수가 존재하지 않도록 상세설계된다. 따라서 보빈부의 질량은 파워소모와 관계없이 결정될 수 있고 구동기의 파워소모에 직접적으로 영향을 미칠 수 있는 변수는 M_c 임을 알 수 있다. 따라서, 식 (8)을 M_c 에 대하여 편미분하고 $\frac{\partial P}{\partial M_c} = 0$ 라고 두면, 다음과 같이 파워소모가 최소로 되는 M_c 를 얻을 수 있다.

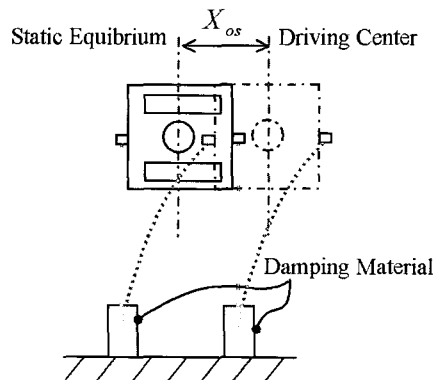


Fig. 2 A tracking state with an offset, X_{os}

$$M_c = \frac{\left(M_a^2 \omega^4 + (C^2 - 2kM_a) \omega^2 + k^2 + k^2 \cdot \left(\frac{X_{os}}{X(\omega)} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}}{\omega^2}$$

위의 식에서 파워 소모가 최소로 되는 M_c 는 주파수의 함수일 뿐만 아니라 스프링 상수, 감쇠 상수 그리고 디스크의 진동량과 구동기의 초기위치에 의하여 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

2.2 구동기의 감도비

기존의 구동기 성능은 Fig. 3에서와 같이 DC, AC 감도, 공진 주파수, Q값 등으로 정의된다. 여기서 DC, AC감도는 각각 저주파수, 고주파수 영역에서의 구동기 감도를 나타내며, 1차 공진 주파수(f_n), Q값은 구동기의 과도응답 특성을 나타내는 성능지수로 볼 수 있다. 그림에서 E 는 구동코일에 인가되는 전압을 나타낸다.

이러한 성능들은 구동기의 기계적 파라미터 M, k, C, ϕ 로만 정의 되기 때문에 구동기 서보가 바뀌게 되면 성능치들도 다시 계산되어야 한다. 따라서 이 절에서는 구동기의 기계적 성능과 서보 성능을 포괄적으로 보여줄 수 있는 감도비를 주파수의 함수로 정의한다. 기존의 구동기 성능을 나타내는 DC, AC 감도, 1차 공진 주파수, Q값 대신에 전 주파수 대역에서 정의되는 감도비는 서보 제어의 개념을 도입하여 목표 성능에 대한 명확한 근거를 제시할 수가 있다.

먼저 다음과 같이 구동기의 DC, AC감도와 서보의 개루프 이득을 정의한다.

Ψ_{dc} : 구동기의 DC 감도

Ψ_{ac} : 구동기의 AC 감도

α : 개루프 이득

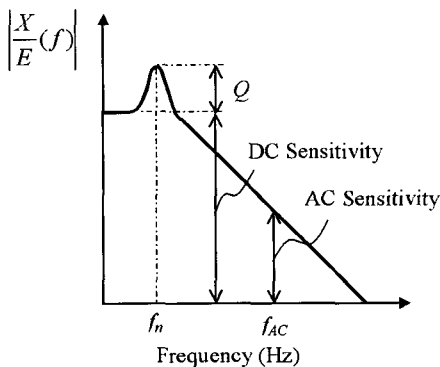


Fig. 3 A frequency response of actuator

또한, 식 (9)와 같이 참고 서보를 정의한다. 일반적으로 참고 서보는 CD/DVD 규격집으로부터 주어 지는데, 이러한 참고 서보는 Phase Lead 보상기로 되어있고 광디스크 드라이브에서 사용되는 구동기의 제어기는 이러한 보상기를 기초로 설계된다. 실제 사용되는 제어기는 고차의 Lead-Lag보상기로 구성 되어 있지만 대략적인 성능은 이러한 참고 서보로부터 크게 벗어나지 않는다. 식 (2)에서 알 수 있듯이 구동기의 전달함수는 고주파수 영역에서 -40 dB/Decade의 기울기를 갖는 2차 구동기로 근사화 될 수 있고 0dB를 지나는 구동기의 개루프 절점 주파수를 라고 하면, 식 (9)의 $\left(\frac{\omega_c}{i\omega} \right)^2$ 는 고주파수 대역에서 2차 구동기의 특성을 나타낸다. 즉, Fig. 4에서와 같이 구동기의 개루프 특성은 2차 구동기의 주파수 응답 특성과 같이 -40 dB/Decade의 기울기로 주파수가 증가할 때, 감소하는 것을 볼 수 있으며 Phase Lead 보상기의 영점과 극점 주파수($\frac{\omega_c}{3}, 3\omega_c$)에서는 -20 dB/Decade의 기울기를 갖도록 참고서보가 설계된다. 특히, 이러한 참고서보는 광디스크 드라이브의 초기 개발자에 의해서 제안된 표준규격 사항이고 영점과 극점 주파수도 실험과 경험치에 의해서 주 개발자가 제안한 사항이므로, 이 논문에서는 이러한 사항을 따 르기로 한다.

$$1 + H_N = 1 + \frac{1}{3} \left(\frac{\omega_c}{i\omega} \right)^2 \cdot \frac{1 + \frac{3 \cdot i\omega}{\omega_c}}{1 + \frac{i\omega}{3 \cdot \omega_c}} \tag{9}$$

여기서, H_N 은 실제 디스크 드라이브의 개루프 전달함수에 대응되는 참고서보의 개루프 전달함수를 의

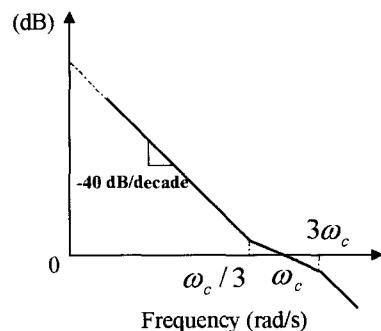


Fig. 4 A reference servo of actuator

미하며, ω_c 는 0 dB를 지나는 절점 주파수를 나타내고 디스크 드라이브의 배속(디스크의 회전속도)에 의해서 주로 결정된다. 이러한 Phase Lead 보상기가 없을 경우에는 절점 주파수에서도 기울기가 -40 dB/Decade되어서 결국 페루프 전달함수와 구동기는 절점 주파수 근처에서 발진하게 된다. 따라서 보상기의 첨가는 절점 주파수 근처에서 충분한 위상 여유를 갖게 함으로써 서보의 안정성을 도모한다. 따라서 식 (9)를 이용하여 식 (10)과 같이 참고 서보의 상, 하한을 정의할 수 있는데, 이러한 서보의 상, 하한을 정의하는 것은 구동기의 서보가 디스크의 트랙 및 면 진동을 보상할 수 있도록 충분한 여유를 갖게 함과 동시에 원하는 서보 대역의 절점 주파수를 정의된 구간에서 안정되게 확보하기 위함이다.

$$G_{low} = \begin{cases} 20\log(\gamma_1 \cdot |1 + H_N|_{\omega=\omega_o}), & \omega < \omega_o \\ 20\log(\gamma_1 \cdot |1 + H_N|), & \omega \geq \omega_o \end{cases}$$

$$G_{high} = \begin{cases} 20\log(\gamma_1 \cdot |1 + H_N|_{\omega=\omega_o}) + \Delta G, & \omega < \omega_o \\ m \cdot \log \omega + n, & \omega_o \leq \omega < \omega_1 \\ 20\log(\gamma_2 \cdot |1 + H_N|), & \omega \geq \omega_1 \end{cases} \quad (10)$$

여기서, $\gamma_1 \leq 1, \gamma_2 \leq 1$ 은 각각 참고 서보의 상, 하한 사이에서 충분한 여유를 주기 위한 상수를 의미하는데 결국 서보의 상한과 하한사이의 간격을 규정한다. 구동기 개발자에 따라 달라질 수 있지만, 일반적으로 광디스크 드라이브의 경우 $\gamma_1 = 0.9, \gamma_2 = 1.1$ 을 사용한다. ΔG 는 디스크 내주의 회전주파수 이하에서 발생하는 디스크 진동량을 충분히 보상하기 위한 추가적인 여유량을 나타낸다. 또한, ω_o, ω_1 는 각각 디스크 내주의 회전 주파수, $G_{high}(\omega_o \leq \omega < \omega_1)$ 과 $G_{high}(\omega \geq \omega_1)$ 이 교차하는 교차 주파수를 나타낸다. 또한, m, n 은 다음과 같이 표현된다.

$$m = \frac{1}{\log(\omega_o / \omega_1)} \cdot 20\log\left(\frac{\Delta G \cdot \gamma_1 |1 + H_N|_{\omega=\omega_o}}{\gamma_2 |1 + H_N|_{\omega=\omega_1}}\right)$$

$$n = \frac{1}{\log(\omega_o / \omega_1)} \times \left\{ 20\log(\omega_o) \log(\gamma_2 |1 + H_N|_{\omega=\omega_1}) - \log(\omega_1) \log(\gamma_1 |1 + H_N|_{\omega=\omega_o}) - \log(\omega_1) \log(\Delta G) \right\} \quad (11)$$

식 (10)과 (11)의 자세한 유도과정은 부록 B에 수

록하였다.

또한, ϵ 을 디스크 드라이브에서 오차없이 정보를 읽고 쓰기 위하여 허용되는 잔류 면진동 혹은 잔류 트랙진동량이라고 할 때, 디스크의 트랙진동 및 면진동을 보상하기 위한 구동기의 실제 개루프 게인 (x/ϵ)을 주파수의 함수로 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$G_{act}(\omega) = 20\log\left\{ \alpha \cdot \frac{\phi}{\left((k - M\omega^2)^2 + 4\zeta^2 M k \omega^2 \right)^{\frac{1}{2}}} \cdot C_L(\omega) \right\} \quad (12)$$

여기서, $\alpha, C_L(\omega)$ 는 각각 개루프 이득, Phase Lead 보상기를 나타낸다. 일반적으로 $C_L(\omega)$ 은 교차 주파수 근처에서 영향을 미치는 제어기 이므로, 절점 주파수 이하의 영역에서는 다음과 같은 식이 성립한다.

$$G_{act}(\omega) = 20\log\left\{ \alpha \cdot \frac{\phi}{\left((k - M\omega^2)^2 + 4\zeta^2 M k \omega^2 \right)^{\frac{1}{2}}} \cdot C_L^*(\omega) \right\} \quad (13)$$

여기서 $C_L^*(\omega)$ 는 저주파수 대역에서의 Phase Lead 보상기 특성을 나타낸다. 이러한 참고 서보와 구동기의 게인 사이에는 다음과 같은 관계가 성립해야 하며, 이것은 전술한 바와 같이 구동기의 서보가 디스크의 트랙 및 면 진동을 보상할 수 있도록 충분한 여유를 갖게 하기 위함이다.

$$G_{low}(0) \leq G_{act}(0) \leq G_{high}(0)$$

$$G_{low}(\omega) \leq G_{act}(\omega) \leq G_{high}(\omega) \quad (14)$$

또한, 식 (3)으로부터 구동기의 DC, AC 감도를 식 (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\psi_{dc} = \frac{\phi}{k}, \quad \psi_{ac} = \frac{\phi}{\sqrt{(k - M\omega^2)^2 + C^2 \omega^2}} \quad (15)$$

따라서, 식 (13)~(15)를 이용하여 구동기의 DC 감도에 대한 AC 감도비를 유도해 보면 다음과 같은 식 (16)를 얻을 수 있다.

$$10 \frac{(C_{os}(\omega) - C_{os}(0))}{20} \leq \frac{\psi_{\alpha} k}{\psi_{\alpha} ((k - M\omega^2)^2 + 4\zeta^2 M k \omega^2)^{1/2}} \leq 10 \frac{(C_{os}(\omega) - C_{os}(0))}{20} \quad (16)$$

즉, 구동기는 모든 주파수 영역에서 위의 부등식을 만족하도록 설계되어야 한다. 위의 부등식에서 가운데 부분의 수식은 구동기의 질량, 스프링 상수, 감쇠 계수 등으로 이루어져 있으며 구동기의 DC 감도에 대한 AC 감도비를 나타낸다. 그리고 부등식의 상, 하한은 앞서 정의한 주파수 영역에서의 참고 서보의 상, 하한 값으로부터 정의되는 값들이다. 따라서 위의 부등식을 만족함으로써 구동기는 자동적으로 DC/AC 감도와 Q값 등을 만족시킬 수 있다는 것을 알 수 있다. 기존의 논문에서는 구동기의 DC, AC 감도, 1차 공진 주파수, Q값 등이 적용된 서보에 대한 설명 없이 임의의 목표 치로 미리 주어지고 최적설계가 수행되는 반면, 위의 식은 참고 서보와 구동기의 감도비를 이용하기 때문에 구동기의 성능에 관련된 DC, AC 감도, 1차 공진 주파수, Q값 등의 목표 치에 대한 규정 없이도 위의 부등식을 만족하면 서보 성능을 포함한 구동기의 성능을 모두 만족시킬 수 있다. 즉, 서보와 구동기의 목표 성능을 주파수 영역에서 합축적으로 명쾌하게 설명한 수식이라고 할 수 있으며 다음 장에서 다루게 될 최적설계에 유용하게 적용된다.

또한, 코일에 인가되는 전류와 전압과의 관계도 식 (17)과 같은 부등식을 만족하여야 한다. 여기서, 코일의 인덕턴스에 의한 영향은 무시하였다. 이 부등식이 의미하는 바는 코일에 인가되는 전류에 의한 전압과 역기전력에 의한 전압의 합이 인가되는 최대 전압보다 작아야 한다는 것이다.

$$R_c \cdot i(t) + \phi \cdot \dot{x}(t) \leq E \quad (17)$$

또한, 구동기의 최대 변위, 속도, 가속도 등을 식 (18)과 같이 나타낼 수 있으며, 이 식을 식 (17)에 대입하여 정리하면 식 (19)를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \ddot{x}_{\max} &= \left| X(\omega) \cdot \omega^2 \right|_{\max} \\ \dot{x}_{\max} &= \left| X(\omega) \cdot \omega \right|_{\max} \\ x_{\max} &= \left| X(\omega) + X_{os} \right|_{\max} \end{aligned} \quad (18)$$

$$\frac{k_R}{2B_g a d_c^2} \left((M_a + M_c) \ddot{x}_{\max} + C \dot{x}_{\max} + k x_{\max} \right) + \frac{2B_g M_c}{D_c d_o^2} \dot{x}_{\max} \leq E \quad (19)$$

마지막으로 구동기는 다음과 같은 정적 처짐 양에 대한 부등식을 만족하여야 한다.

$$\frac{(M_a + M_c) \cdot g}{k} \leq \delta_s$$

여기서, g , δ_s 는 각각 중력가속도와 허용 정적 처짐 양이다. 즉, 구동부 자체 무게에 의한 정적 처짐 양이 허용 정적 처짐 양보다 크게 되지 않아야 한다. 이러한 정적 처짐 양은 드라이브의 크기와 구동부의 작동 거리에 따라 적절한 값으로 주어진다.

3. 구동기의 최적설계

3.1 파워 소모와 최적 코일 질량

먼저 주파수 영역에서 구동기의 파워 소모에 대한 시뮬레이션 결과를 보기로 한다. Table 1은 시뮬레이션에 사용된 구동기의 파라미터를 나타낸다.

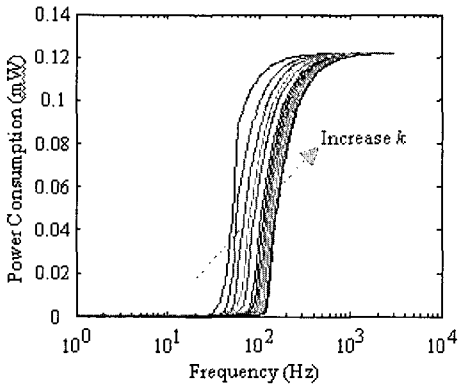
Table 1에 나타낸 파라미터들을 이용하여 주파수 영역에서 구동기의 파워 소모량을 시뮬레이션 해보면 Fig. 5와 같은 결과를 얻을 수 있다. Fig. 5는 구동기의 X_{os} 가 "0"이고 스프링 상수(k)가 10~150 N/m사이에서 변할 때, 구동기의 파워 소모와 최적의 M_c 를 나타낸다. 그림 (a)는 최적으로 구해진 M_c 에서의 파워 소모를 나타내며 그림 (b)는 $M_c = 0.3$ g일 경우 파워 소모를 보여준다.

그림에서 보는 바와 같이, 최적의 코일 질량에서 저주파수 대역의 파워 소모가 상당히 감소하는 것을 알 수 있다. 그림 6(c)에서는 저주파수 대역에서 최적코일 질량이 스프링 상수(k)에 따라 급격히 변화하는 것을 볼 수 있다.

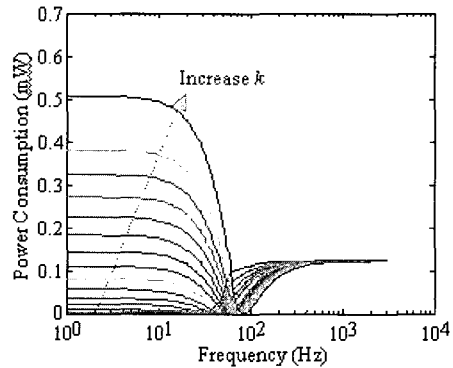
그림 (d)~(f)는 각각 스프링 상수가 10, 50, 100 N/m의 경우를 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이, 스프링 상수가 커질수록 저역 주파수 대역에서 파워 소모가 크게 감소하는 것을 볼 수 있다. 이것은 특히 구동기가 중심으로부터 벗어나 있을 때, 즉 X_{os} 가 크게 발생할수록 코일의 최적 질량의 효과가 두드러지게 나타난다는 것을 의미한다.

또한, 디스크의 회전 주파수 이상의 고주파수 대역에서는 최적 질량은 급속히 감소하는 것을 알 수 있다. 이론적으로 $X_{os}=0$ 일 때, 고주파수가 될수록 최적 질량은 코일부를 제외한 구동기의 나머지 질량과 같게 되며 스프링 상수에 영향을 받지 않는다. 즉, 이

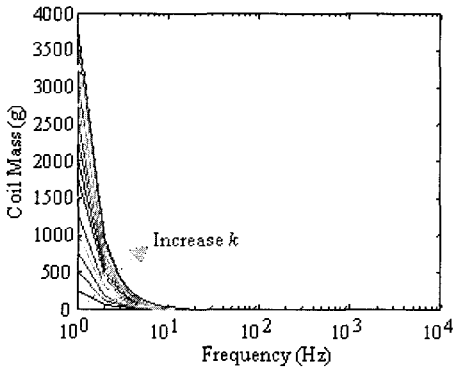
경우에는 M_a 가 0.25 g이기 때문에 최적 질량도 0.25 g에 수렴하게 된다. Fig.6은 X_{os} 가 100 μm 일 때 파워 소모를 나타낸다. 시뮬레이션 결과에서 볼 수 있듯이, X_{os} 의 존재로 인하여 파워 소모가 급격히 증가된 것을 알 수 있다. 그러나 최적 코일 질량의 경



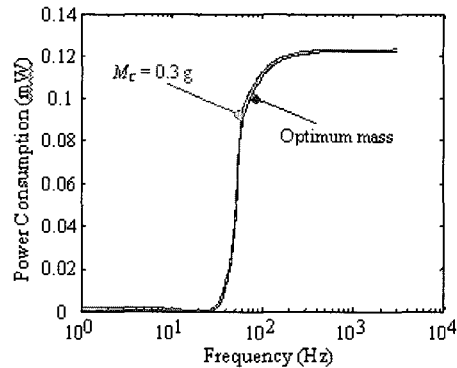
(a) Power consumption at optimum M_c



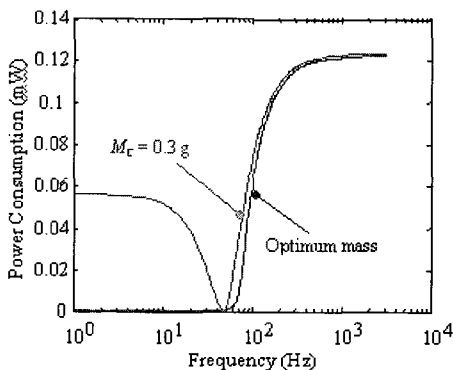
(b) Power consumption at $M_c = 0.3 \text{ g}$



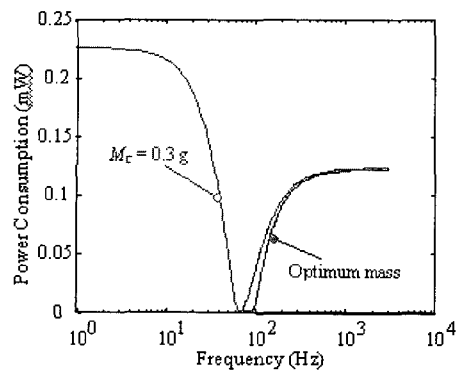
(c) Optimum coil mass, M_c



(d) Power consumption at $k = 10 \text{ N/m}$



(e) Power consumption at $k = 50 \text{ N/m}$



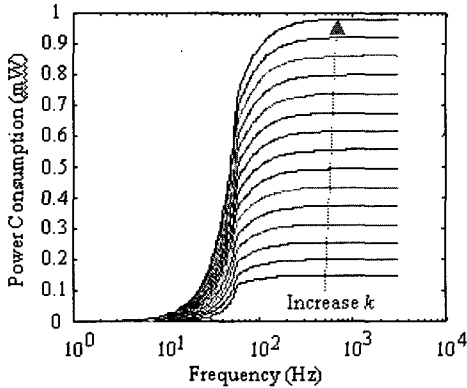
(f) Power consumption at $k = 100 \text{ N/m}$

Fig. 5 Power consumption and optimum coil mass of an actuator with $X_{os} = 0$

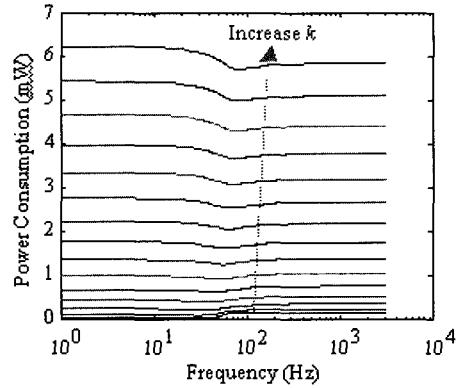
우에는 이러한 파워 소모가 상당히 감소됨을 볼 수 있다.

특히, 이 경우에는 고주파수 영역에서 k 의 값에 따라 최적 코일 질량의 수렴 값이 다르게 된다. 이것은 스프링 상수(k)와 X_{∞} 이 고주파수영역에서도 영향을

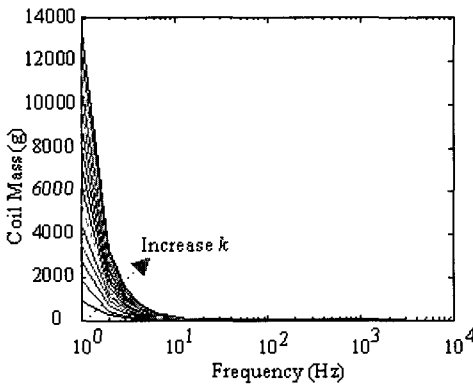
미치기 때문이다. Fig. 7은 고주파수 영역에서 최적 코일 질량의 수렴 값을 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 X_{∞} 가 존재하는 경우 스프링 상수(k)가 커질수록 최적 코일 질량도 커지는 것을 알 수 있다. 그림 (a)는 X_{∞} 가 없는 경우인데 스프링 상수가 커져



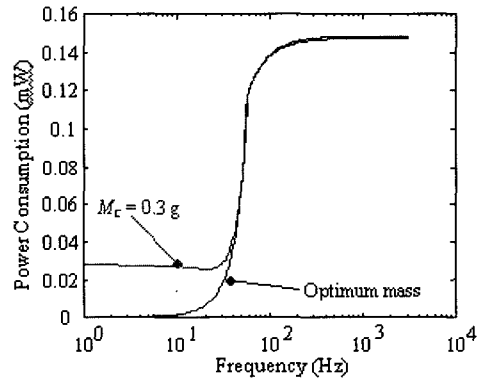
(a) Power consumption at optimum M_c



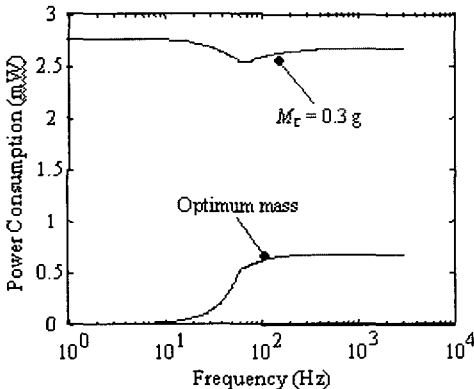
(b) Power consumption at $M_c = 0.3 \text{ g}$



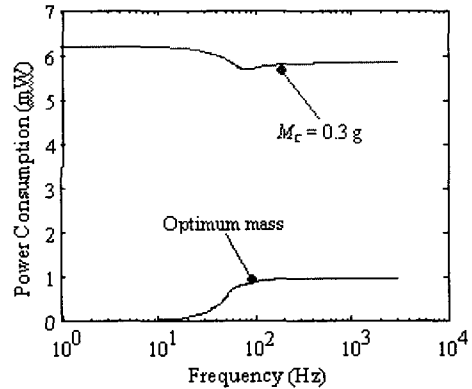
(c) Optimum coil mass, M_c



(d) Power consumption at $k = 10 \text{ N/m}$



(e) Power consumption at $k = 50 \text{ N/m}$



(f) Power consumption at $k = 100 \text{ N/m}$

Fig. 6 Power consumption and optimum coil mass of an actuator with $X_{\infty} = 100$

도 최적 코일 질량은 거의 0.25 g에서 크게 벗어나지 않는 것을 알 수 있다. 반면 그림 (b)의 경우에는 스프링 상수의 증가에 따라 최적 코일 질량도 점차적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 이것은 전술한 바와 같이 X_{os} 가 존재할 때, 고주파수 영역에서도 스프링 상수(k)와 X_{os} 이 최적 코일 질량에 영향을 미친다는 것을 말해준다.

이러한 코일 질량은 주파수의 함수이기 때문에 코일부의 질량을 고주파수 대역에서 파워 소모가 최소가 되도록 설정했다면 저주파수 대역에서 발생하는 파워 소모는 감소시킬 수 없을 것이다. 반대로 저주파수 대역의 파워 소모를 최소가 되도록 설정하면 고주파수 대역의 파워 소모는 줄일 수 없을 것이다. 즉, 어떤 특정 주파수마다 파워 소모가 최소가 되는 적 질량이 계산된다는 의미이다. 그러나 실제 구동기의 질량은 주파수마다 다른 값으로 주어질 수는 없으며 전 주파수 대역에서 적절하고 최적으로 결정되어야 한다. 이러한 최적의 코일 질량을 결정하기 위하여 먼저 시뮬레이션에 사용된 디스크의 진동량에 관계된 식을 살펴본다.

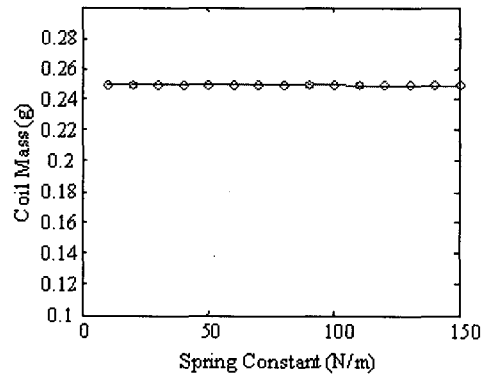
$$X(\omega) = \begin{cases} \varepsilon \cdot \left(\frac{\omega_c}{\omega_o}\right)^2, & \omega \leq \omega_o \\ \varepsilon \cdot \left(\frac{\omega_c}{\omega}\right)^2, & \omega > \omega_o \end{cases} \quad (20)$$

Table 1 Simulation parameters for the calculation of power consumption

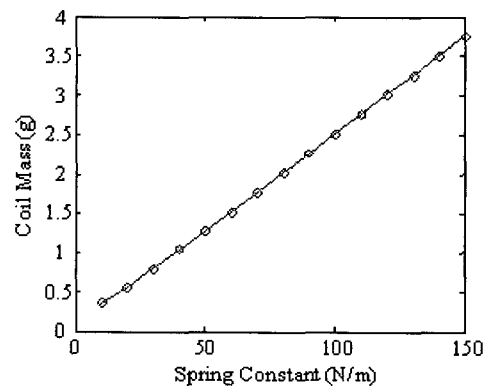
Simulation parameters	Symbols	Values
Proportional constant [m]	k_R	2.54E-8
Magnetic flux density [T]	B_g	0.3
Fractional utilization of coil turn	a	0.3
Remaining actuator mass [kg]	M_a	0.25E-3
Coil diameter [m]	d_o	0.1E-3
Coil diameter (conductor) [m]	d_c	0.09E-3
Allowable disk runout [m]	ε	15E-9
Actuator's offset displacement [m]	X_{os}	0, 100E-6
Spring constant [N/m]	k	10~150
Damping coefficient [Ns/m]	C	0.017
Cross frequency [Hz]	f_1	100
Inner rotation frequency [Hz]	f_o	58.3
Cutoff frequency [Hz]	f_c	2,600

위의 식에서 ε 을 디스크 드라이브에서 오차없이 정보를 읽고 쓰기 위하여 허용되는 잔류 면진동 혹은 잔류 트랙진동량이라고 할 때, 절점 주파수(ω_c)에서 이러한 ε 은 0 dB에 해당되며 디스크의 회전 주파수(ω_o)에서 절점 주파수까지의 구간에서는 식 (20)에서 정의한 바와 같이 -40 dB/Decade의 기울기로 진동량이 감소한다. 이것은 광디스크 규격에 정의된 사항으로 초기에 실험적으로 결정된 양이다. 또한, 회전 주파수 이하의 구간을 DC영역이라 부르고 이 영역에서의 진동량은 회전 주파수에서의 값과 동일한 $\varepsilon \cdot \left(\frac{\omega_c}{\omega_o}\right)^2$ 로 정의된다. 디스크의 회전 주파수가 디스크 진동의 주 주파수이므로, 임의의 순간에 디스크의 진동량(X_{disc})을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$X_{disc} = X_{os} + \sum_{r=1}^n X(r \cdot \omega_o) \quad (21)$$



(a) $X_{os} = 0 \mu\text{m}$



(b) $X_{os} = 100 \mu\text{m}$

Fig. 7 Converged optimum coil mass at $f_c = 2,600$ Hz

여기서, n 은 주 주파수의 배수 주파수가 절점 주파수를 넘지 않을 때까지의 배수를 나타낸다. 따라서 구동기가 임의의 순간에 디스크의 목표트랙을 추종하기 위해서는 식 (21)과 같이 주파수 전개함수로 정의된 디스크의 진동량을 보상하면서 구동 되어야 한다. 마찬가지로 구동기의 파워 소모에서도 유사한 수식을 다음과 같이 전개할 수 있다.

$$P_{disc} = \sum_{r=1}^n P(r \cdot \omega_o) \quad (22)$$

식 (22)에서 X_{os} 에 관련된 항을 볼 수 없는데, 이것은 식 (5)에서 볼 수 있듯이 X_{os} 관련 항이 주파수에 대한 파워 소모식 $P(\omega)$ 에 포함되어 있기 때문이다. 따라서 구동기가 구동 되는 전 주파수 대역에서 발생하는 파워 소모를 최소화하기 위해서는 식 (22)와 같이 정의된 전체 파워 소모량 P_{disc} 이 최소가 되도록 최적 코일 질량을 결정해야 한다.

Fig. 8은 코일 질량에 대한 전체 파워 소모량 P_{disc} 를 나타낸다. 그림 (a)는 X_{os} 가 "0"인 경우를 (b)는 $X_{os}=100 \mu\text{m}$ 인 경우를 나타낸다. 그림 (a)에서 최적 코일 질량은 0.243g으로 코일을 제외한 구동기의 질량 $M_a(0.25\text{g})$ 와 거의 같음을 알 수 있다. 그러나 X_{os} 가 존재할 경우에는 최적 질량이 크게 달라지는 것을 그림 (b)의 결과에서 볼 수 있다. $X_{os}=100 \mu\text{m}$ 인 경우에 최적 질량은 1.273g이고 전체 파워 소모량도 X_{os} 가 없는 경우보다 상당히 증가함을 알 수 있다. 다음 절에서는 이러한 전체 파워 소모량을 최소화 되도록 함과 동시에 앞장에서 정의한 구동기의 감도비를 만족하도록 구동기를 최적 설계하는 방법을 제안한다.

3.2 구동기의 최적 설계

이 절에서는 앞 장에서 유도된 구동기의 파워 소모식과 감도비를 이용하여 요구하는 구동기의 참고 서보를 만족하면서 전체 파워 소모가 최소로 되는 구동기를 최적설계 하는 방법을 제안한다. 먼저 최적설계의 일반적인 정의로부터, 다음과 같이 목적 함수와 구속조건을 정의 할 수 있다.

$$\begin{aligned} \min J(b) \\ \text{s.t. } \Psi_i(b) \leq 0, i=1, \dots, ngc \end{aligned} \quad (23)$$

여기서, ngc 는 부등 구속조건의 총수를 나타내고는 최적 설계 변수들을 의미한다. 따라서 이 논문에서 다루는 구동기의 최적설계 문제는 다음과 같이 수식화 할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Psi_1(b) &= \frac{-k}{((k-M\omega^2)^2 + 4\zeta^2 M k \omega^2)^{\frac{1}{2}}} + 10 \left(\frac{G_{low}(\omega) - G_{high}(0)}{20} \right) \Big|_{\omega=\omega_o} \\ \Psi_2(b) &= \frac{k}{((k-M\omega^2)^2 + 4\zeta^2 M k \omega^2)^{\frac{1}{2}}} - 10 \left(\frac{G_{high}(\omega) - G_{low}(0)}{20} \right) \Big|_{\omega=\omega_o} \\ \Psi_3(b) &= \frac{-k}{((k-M\omega^2)^2 + 4\zeta^2 M k \omega^2)^{\frac{1}{2}}} + 10 \left(\frac{G_{low}(\omega) - G_{high}(0)}{20} \right) \Big|_{\omega=\omega_o} \end{aligned}$$

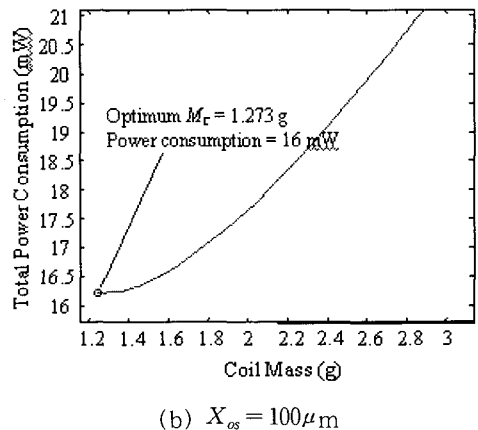
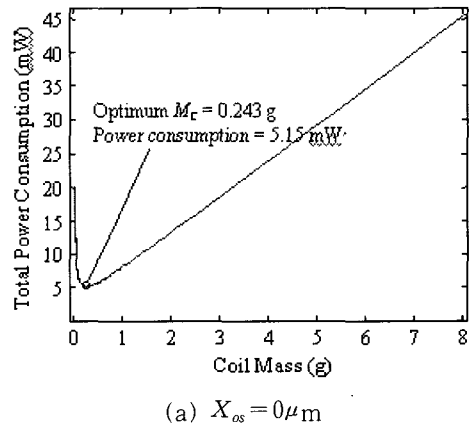


Fig. 8 Total power consumption w.r.t. coil mass

$$\begin{aligned}
 J(b) &= P_{disc} \\
 \Psi_4(b) &= \frac{k}{((k-M\omega^2)^2 + 4\zeta^2 M k \omega^2)^{\frac{1}{2}}} - 10 \left\{ \frac{G_{req}(\omega) - G_{lim}(\omega)}{20} \right\} \Big|_{\omega=\omega_0} \\
 \Psi_5(b) &= \frac{-k}{((k-M\omega^2)^2 + 4\zeta^2 M k \omega^2)^{\frac{1}{2}}} + 10 \left\{ \frac{G_{lim}(\omega) - G_{req}(\omega)}{20} \right\} \Big|_{\omega=\omega_0} \\
 \Psi_6(b) &= \frac{k}{((k-M\omega^2)^2 + 4\zeta^2 M k \omega^2)^{\frac{1}{2}}} - 10 \left\{ \frac{G_{req}(\omega) - G_{lim}(\omega)}{20} \right\} \Big|_{\omega=\omega_0} \\
 \Psi_7(b) &= \frac{k_R}{2B_x a d_c^2} ((M_a + M_c) \ddot{x}_{max} + C \dot{x}_{max} + k x_{max}) + \frac{2B_x M_c}{D_c d_o^2} \dot{x}_{max} - E \\
 \Psi_8(b) &= \frac{(M_a + M_c) g}{k} - \delta_s \tag{24}
 \end{aligned}$$

즉, 목적 함수는 앞 절에서 정의한 전체 파워 소모량 P_{disc} 을 최소화하는 것이고 구속 조건들은 참고 서보로부터 전개된 감도비에 대한 구속 조건들($\Psi_1(b) \sim \Psi_6(b)$)과 구동기의 변위, 속도, 가속도와 인가되는 전압과의 관계($\Psi_7(b)$)와 정적 처짐량에 관계된 구속 조건($\Psi_8(b)$) 등으로 구성된다. 특히, 감도비는 주파수의 함수이기 때문에 모든 주파수 영역에서 이러한 구속조건을 만족하여야 한다. 그러나 시뮬레이션에서는 전 주파수 영역을 구속조건으로 잡기가 어렵기 때문에 주요 주파수인 디스크 내주 회전주파수(ω_0), 교차 주파수(ω_1), 서보의 절점 주파수(ω_c)에 대해서만 구속조건을 사용하였다. 실제 시뮬레이션 결과를 보면 이러한 구속조건을 만족할 경우 전 주파수 영역에서 감도비 구속조건을 만족하는 것을 볼 수 있었다.

이 논문에서 제안한 최적설계 방법에 대한 시뮬레이션을 수행하기 위하여 다음과 같이 설계 변수들에 대한 조건들을 Table 2에 나타내었고 구속조건에 관련된 파라미터들로서 참고 서보의 상, 하한사이에서 충분한 여유를 주기 위한 상수 값들과 최대 정적 처짐량, 최대 인가 전압에 대한 값들은 Table 3에 나타내었다. 나머지 구동기 파라미터들은 Table 1과 같다.

위의 설계변수와 시뮬레이션 파라미터들을 사용하고 앞서 정의한 목적함수 및 구속조건 등을 이용하여 최적설계를 수행하였다. SQP(sequential quadratic programming)이 구속조건을 갖는 최적설계 문제에

적당하기 때문에 이 논문에서는 최적설계를 위하여 이러한 SQP 기법을 사용하였다.

Fig. 9는 X_{os} 가 "0"인 경우에 대한 최적 설계 결과를 나타낸다. 최적설계 결과는 반복횟수가 대략 30회 정도면 수렴하고 활성 구속조건은 $\Psi_3(b), \Psi_5(b)$ 이다. 그림 (a)와 (b)는 각각 최적 코일 질량 $M_c = 0.243$ g과 $M_c = 0.3$ g일 때의 파워 소모량과 전류량을 주파수 영역에서 비교한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 디스크의 내주 회전 주파수 이하에서는 $M_c = 0.3$ g의 경우가 파워 소모량 및 전류량에서 최적 코일 질량의 경우보다 작지만, 회전 주파수 이상의 고주파수 영역에서는 최적 코일 질량의 경우가 더 작아짐을 알 수 있다. 그림 (c)는 참고 서보의 상, 하한을 나타낸다. 이러한 참고 서보를 사용하여 최적 설계를 한 결과 감도비(ψ_{ac}/ψ_{dc})는 그림 (d)와 같이 나타낸다. 그림에서 감도비는 구속조건 $\Psi_1(b) \sim \Psi_6(b)$ 를 만족하는 것을 볼 수 있다. 그림 (e)는 코일 질량에 따른 전체 파워 소모량을 나타낸 것인데, 코일 질량이 0.243 g에서 최소가 됨을 볼 수 있다. 이때의 전체 파워 소모량은 5.134 mW이다. 따라서 구동기는 앞서 정의된 식 (14)를 이용하여 구속조건을 만족하면서 전체 파워 소모량이 최소가 되도록 최적 설계되었다.

Table 4는 최적 설계된 구동기의 설계변수를 나타낸다. 이러한 최적 설계치들은 초기치를 다양하게 변화시켜도 최적치로 수렴한다. 최적 설계치 중에서 스프링 상수와 댐핑 계수는 설계 범위 내의 최적 값으

Table 2 Design parameters of an actuator

Design parameters	Symbols	Ranges
Spring constant	k	10~100 [N/m]
Damping coefficient	C	0.01~0.05 [Ns/m]
Coil diameter	d_o	0.05E-3~0.1E-3 [m]
Coil mass	M_c	Optimally Calculated

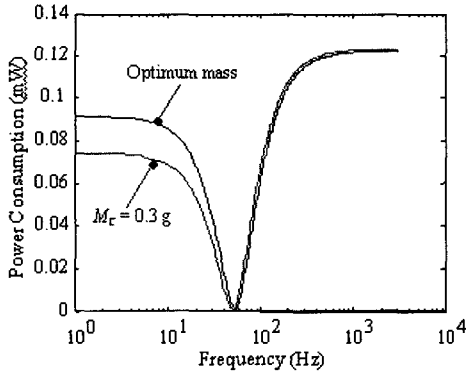
Table 3 Simulation parameters for the inequality constraints

Design parameters	Symbols	Ranges
Margin constant	γ_1	0.9
Margin constant	γ_2	1.1
DC gain margin	ΔG	20 [dB]
Maximum voltage	E	2 [V]
Allowable deflection	δ_s	300E ⁻⁶ [m]

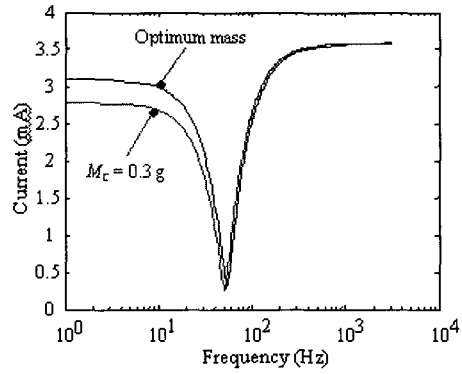
로 수렴하였고 코일의 직경(d_0)은 최대 값으로 수렴하였다.

Fig. 10은 X_{os} 가 $100\ \mu\text{m}$ 인 경우에 대한 최적 설계 결과를 나타낸다. 활성 구속조건은 $\Psi_3(b)$, $\Psi_8(b)$ 이다. 그림 (a)와 (b)는 각각 최적 코일 질량 $M_c = 1.246\ \text{g}$

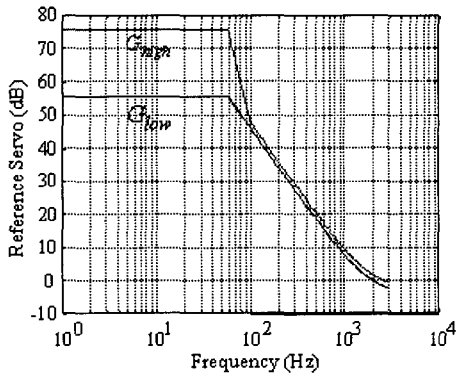
과 $M_c = 0.3\ \text{g}$ 일 때의 파워 소모량과 전류량을 주파수 영역에서 비교한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 최적 코일 질량의 경우가 파워 소모량이 훨씬 작다는 것을 알 수 있다. 감도비(ψ_{ac}/ψ_{dc})는 그림 (c)와 같이 나타난다. 그림 (d)에서는 전체 파워 소모량이 코일



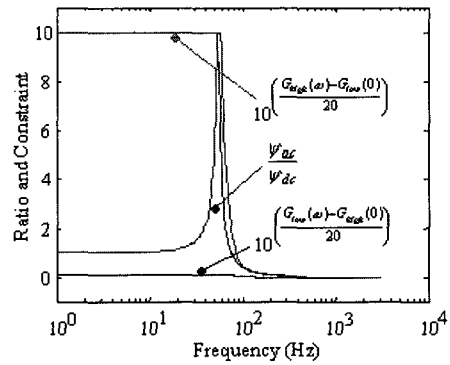
(a) Power consumption



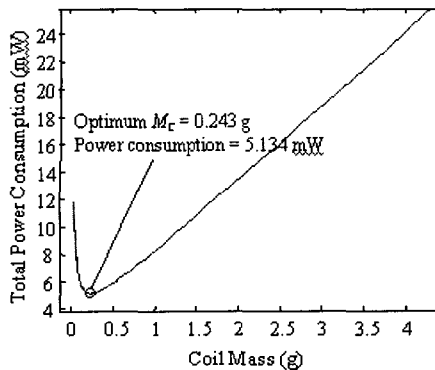
(b) Current



(c) Reference servo



(d) Sensitivity ratio



(e) Total power consumption, P_{disc}

Fig. 9 Results of optimum design w.r.t. $X_{os} = 0\ \mu\text{m}$

질량이 1.246g에서 최소가 됨을 볼 수 있다. 이때의 전체 파워 소모량은 15.93mW이다. Table 5는 최적 설계된 구동기의 설계변수를 나타내고 다양한 초기치의 변화에도 수렴성은 보장된다.

일반적으로 광디스크 드라이브 구동기는 저주파수 및 고주파수 성분의 디스크 면진동, 트랙진동을 추종하게 되는데 회전 주파수 이상의 고주파수 성분의 진동을 보상할 때, 구동기의 속도가 빨라지고 파워소모

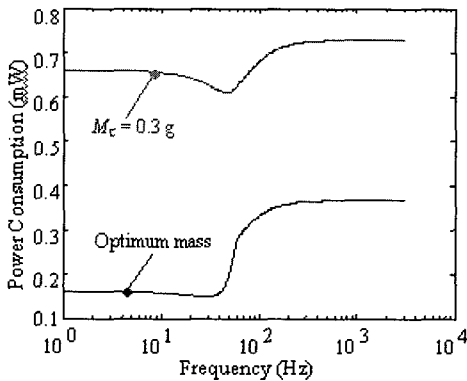
도 상당히 커지게 된다. 또한, 고배속 디스크 드라이브의 경우 고주파수 대역에서의 이러한 파워소모는 더욱 커지게 된다. 따라서 회전 주파수 이상의 고주파수 영역의 파워 소모가 작도록 구동기를 설계하는 것이 중요하다. 이 논문에서는 이러한 고주파수 영역을 포함한 전 주파수 대역에서 소모되는 파워소모를 계산하고 이를 최적설계에 적용하였다. 마지막으로 이 논문에서 제안된 최적설계 방법의 이해를 돕기 위

Table 4 Optimal design values of the actuator ($X_{os}=0$)

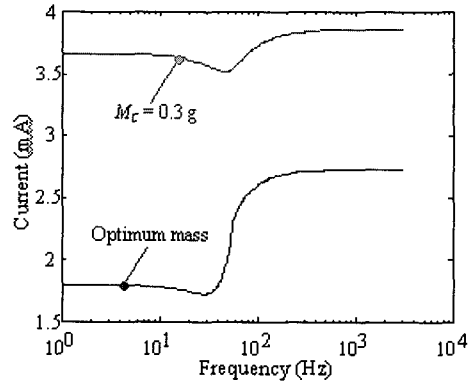
Simulation parameters	Optimal values
k	57.36 [N/m]
C	0.0168 [Ns/m]
d_o	0.1E-3 [m]
M_c	0.243 [g]

Table 5 Optimal design values of the actuator ($X_{os}=100\mu\text{m}$)

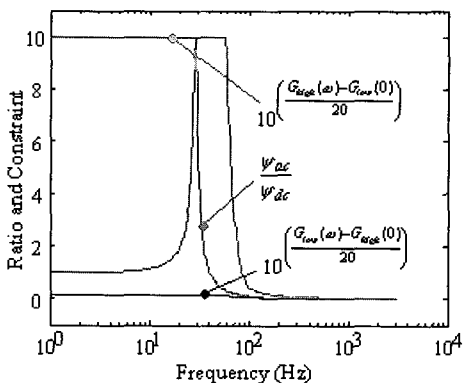
Simulation parameters	Optimal values
k	48.89 [N/m]
C	0.0265 [Ns/m]
d_o	0.1E-3 [m]
M_c	1.246 [g]



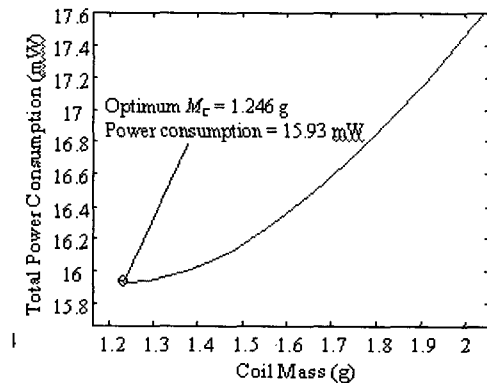
(a) Power consumption



(b) Current



(c) Sensitivity Ratio



(d) Total power consumption, P_{disc}

Fig. 10 Results of optimum design w.r.t. $X_{os}=100\mu\text{m}$

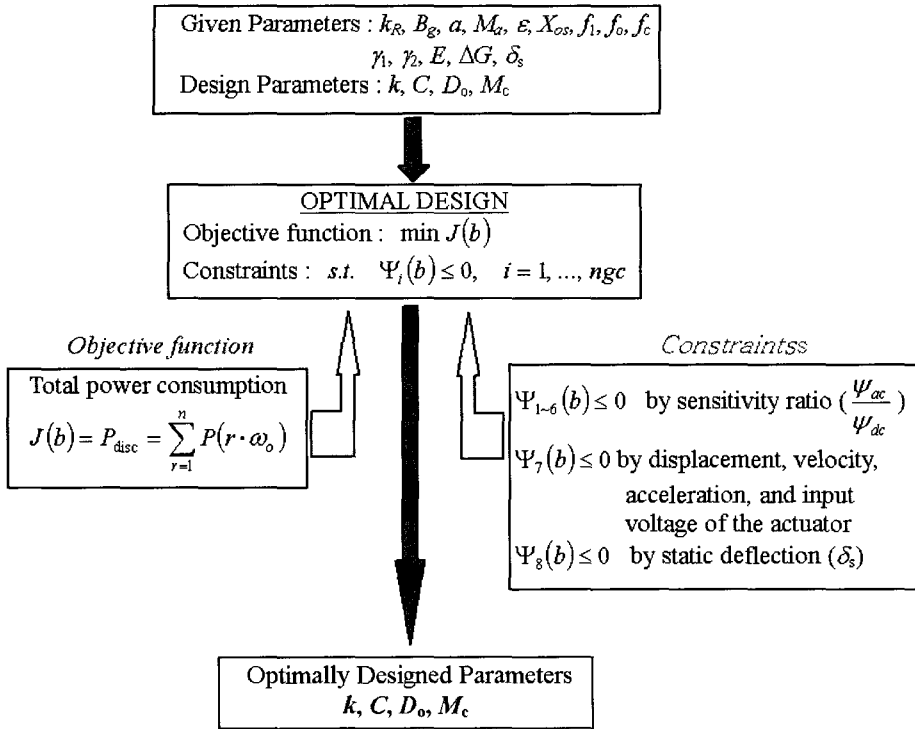


Fig. 11 A flow chart for the proposed optimal design

하여 Fig. 11에 최적설계 방법에 대한 순서도를 나타내었다.

파워 소모 및 감도비에 대한 유도식은 VCM 형식의 구동기 설계에 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

4. 결 론

이 논문에서는 구동기의 동적구동 시에 파워소모를 잘 설명해 줄 수 있도록 구동기의 파워소모에 관련된 수학적 모델을 주파수 영역에서 유도하였다. 또한, 광디스크 드라이브에서 적용하고 있는 일반적인 디스크 규격과 서보 규격을 이용하여 요구되는 목표 성능치에 대한 근거를 제시하고 이를 최적설계에 적용하였다. 구동기가 중심으로부터 이탈하지 않은 경우 ($X_{os}=0$)에는 고주파수 영역에서 파워 소모량에 대한 최적질량 효과가 크게 나타났으며, 중심으로부터 $100 \mu\text{m}$ 이탈한 경우에는 전 주파수 영역에서 파워 소모량이 현저히 작아지도록 최적질량이 계산되었다. 이탈 거리가 클수록 이러한 영향은 크게 나타날 것이다. 또한, 구동기의 요구되는 성능을 만족시키기 위하여 서보 규격을 적용한 최적설계를 수행하였다. 최적설계 수행결과 구동기는 감도비를 만족하였고 요구하는 성능을 갖도록 설계변수가 최적화 되었다. 이러한

참 고 문 헌

- (1) T. Yamamoto, T. Yumura and H. Shimegi, 1986, "Development of High Performance Head Positioner for an Optical Disk Storage System", Proc. SPIE, Vol. 695, pp. 153~159.
- (2) J. Ichihara, K. Tezuka and K. Ogawa, 1992, "Development of Actuators for Small-size Magneto-optical Disk Drives", Jpn. J. Appl. Phys, Vol. 31 (2B), pp. 519~523.
- (3) J. Arthur Wagner, 1983, "The Actuator in High Performance Disk Drives : Design Rules for Minimum Access Time", IEEE Trans. on Mag., Vol. 19(5), pp. 1886~1688.
- (4) M. G. Lee, D. G. Gweon and S. M. Kim, 1997, "Modeling and Optimum Design of a Fine Actuator for Optical Heads", Mechatronics, Vol. 7(7), pp. 573~588.

(5) I. H. Choi, W. E. Chung, Y. J. Kim and et al., 1998, "Compact Disk/digital Video Disk (CD/DVD)-compatible Optical Pickup Actuator for High Density and High Speed", Jpn. J Appl.Phys., Vol. 37, pp. 2189~2196.

(6) H. Fusayasu, Y. Yokota, U. Iwata and H. Inoue, 1998, "Optimization of a Magnetic Actuator with Taguchi Method and Multivariate Analysis Method", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 34(4), pp. 2138~21400.

(7) J. D. Yang and X. D. Pei, 1996, "Seek Time and Trajectories of Time Optimal Control for a Dual Stage Optical Disk Drive Actuator", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 32(5), pp. 3857~3859.

(8) J. D. Yang, X. D. Pei, C. S. Xie, X. Y. Cao and D. Y. Xu, 1997, "Time Optimal Seek Control for a Coupled Dual Stage Disk Drive Actuator", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 33(5), pp. 2629~2631.

(9) S. M. Kim and D. G. Gweon, 2001, "The Optimum Design of a Pick-up Actuator for a Minimum Seek Time", Mechatronics, Vol. 11(6), pp. 649~664.

(10) H. T. Wang, J. J. Liu, S. X. Chen and J. P. Yang, 1999, "Application of Taguchi method to Robust Design of BLDC Motor Performance", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 35(5), pp. 3700~3702.

(11) S. X. Chen, T. S. Low, and B. Bruhl, 1998, "The Robust Design Approach for Reducing Cogging Torque in Permanent Magnet Motors", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 34(4), pp. 2135~2137.

(12) D. H. Jacobson, M. M. Lele and J. L. Speyer, 1971, "New Necessary Conditions of Optimality for Control Problems with State-variable Inequality Constrains", Journal of Mathematical Analysis and Applications, Vol. 35, pp. 255~284.

식 (1A)를 이용하여 식 (2A)와 같이 코일에서 소모되는 파워를 주파수의 함수로 유도할 수 있다. 여기서 I 는 전류를 R_c 는 코일의 저항을 나타낸다.

$$P(\omega) = I^2(\omega) \cdot R_c = \left[\frac{\left\{ (k - M\omega^2)^2 + C^2\omega^2 \right\}^{\frac{1}{2}}}{\phi} \right]^2 \cdot X^2(\omega) \cdot R_c \quad (2A)$$

또한, 코일의 저항(R_c)는 Fig. 12에서 나타낸 것과 같이 코일 파라미터들을 이용하여 식 (3A)와 같이 유도할 수 있다.

$$R_c = \rho_c \frac{l_c}{A_c} = \rho_c \frac{Nl_l}{\pi d_c^2} = k_R \cdot \frac{Nl_l}{d_c^2} \quad \left(\because k_R = \frac{4\rho_c}{\pi} \right) \quad (3A)$$

여기서, ρ_c , l_c , A_c 등은 각각 코일의 고유 저항 (Resistivity), 코일의 총 길이, 코일선의 도체부 단면적을 나타낸다. 또한, k_R , N , l_l , l_c , d_c , d_o , A_l 등은 각각 비례 상수, 코일의 감긴 총 수, 1회 감긴 코일의 길이, 자기장 속에 놓여 있는 코일의 유효길이, 코일에서 도체부의 외경, 코일의 전체 외경, 감긴 코일이 형성하는 단면적을 나타낸다. 코일의 감긴 총 수(N)는 감긴 코일이 형성하는 단면적(A_l)과 코일의 전체 외경(d_o)을 이용하여 식 (4A)와 같이 근사화 할 수 있다. 따라서 식 (4A)를 식 (3A)에 대입하면 식 (5A)와 같이 코일 저항을 유도할 수 있다. B_g 는 영구자석과 요크 사이의 자속 밀도를 의미한다.

$$N \cong \frac{A_l}{d_o^2} \quad (4A)$$

$$\therefore R_c = k_R \cdot \frac{A_l l_l}{d_o^2 d_c^2} \quad (5A)$$

또한, VCM의 힘상수를 식 (4A)와 영구자석과 요크 사이의 자속밀도(B_g)를 이용하여 식 (6A)와 같이 구할 수 있다.

$$\phi = 2Nl_c B_g = \frac{2B_g A_l l_c}{d_o^2} \quad (6A)$$

Fig. 1(a)에서 보는바와 같이 포커싱, 트랙킹 코일의 양쪽에 영구자석과 요크가 장착되어 있으므로 힘

부 록 A

$$\left| \frac{I}{X}(\omega) \right| = \frac{\left\{ (k - M\omega^2)^2 + C^2\omega^2 \right\}^{\frac{1}{2}}}{\phi} \quad (1A)$$

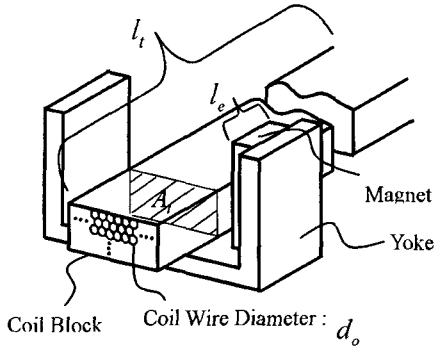


Fig. 12 A structure of coil and magnet assembly

상수는 2배가 되어야 하고 식 (6A)의 2는 이를 나타낸다. 최종적으로 식 (3A)와 식 (6A)를 식 (1A)에 대입하면 파워소모식은 다음과 같이 유도된다.

$$P(\omega) = \frac{k_R}{4B_s^2 a^2 V_c} \times \left(\frac{d_o}{d_c}\right)^2 \times \left[\left\{ (k - M\omega^2)^2 + C^2\omega^2 \right\} \cdot X^2(\omega) \right] \quad (7A)$$

여기서 a 는 1회 감긴 코일의 전체길이에 대한 유효길이의 비(l_e/l_t), V_c 는 코일의 전체 부피를 나타낸다.

부 록 B

Fig. 13은 참고서보의 상하한을 나타낸다. 그림에서 H_N 은 실제 디스크 드라이브의 개루프 전달함수에 대

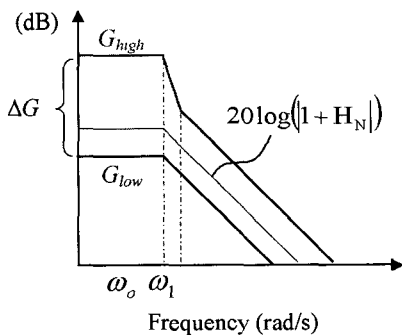


Fig. 13 An upper and lower limit of the reference servo

응되는 참고서보의 개루프 전달함수를 의미하므로, 디스크의 트랙진동, 면진동에 의한 오차를 보상하기 위한 구동기의 실제 개루프 계인(x/ϵ)은 참고서보의 상하한(G_{high}, G_{low})에 있어야 한다는 것을 나타낸다. 여기서 ϵ 은 디스크 드라이브에서 오차없이 정보를 읽고 쓰기 위하여 허용되는 잔류 면진동 혹은 잔류 트랙진동량을 의미하며 x 는 디스크의 트랙진동 및 면진동을 보상하기 위하여 구동기가 움직여야 할 변위를 나타낸다. 따라서 참고서보의 상하한에 대한 식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G_{low} = \begin{cases} 20 \log(\gamma_1 \cdot |1 + H_N|_{\omega=\omega_o}), & \omega < \omega_o \\ 20 \log(\gamma_1 \cdot |1 + H_N|), & \omega \geq \omega_o \end{cases}$$

$$G_{high} = \begin{cases} 20 \log(\gamma_1 \cdot |1 + H_N|_{\omega=\omega_o}) + \Delta G, & \omega < \omega_o \\ m \cdot \log \omega + n, & \omega_o \leq \omega < \omega_1 \\ 20 \log(\gamma_2 \cdot |1 + H_N|), & \omega \geq \omega_1 \end{cases} \quad (1B)$$

$$\gamma_1 \leq 1, \quad \gamma_2 \geq 1$$

특히, $\omega_o \leq \omega \leq \omega_1$ 의 주파수 구간에서 G_{high} 는 $\log \omega$ 를 x 축으로 하는 1차함수와 같이 표현된다. 이 구간에서의 계인은

$$\left(\log \omega_o, 20 \log(\gamma_1 \cdot |1 + H_N|_{\omega=\omega_o}) + \Delta G \right) \text{와}$$

$$\left(\log \omega_1, 20 \log(\gamma_2 \cdot |1 + H_N|_{\omega=\omega_1}) \right)$$

을 지나는 직선으로 표시되므로 $m \cdot \log \omega + n$ 에 위의 두 좌표값을 대입하여 연립하여 풀면 다음과 같이 m, n 을 구할 수 있다.

$$m = \frac{1}{\log(\omega_o / \omega_1)} \cdot 20 \log \left(\frac{\Delta G \cdot \gamma_1 |1 + H_N|_{\omega=\omega_o}}{\gamma_2 |1 + H_N|_{\omega=\omega_1}} \right)$$

$$n = \frac{1}{\log(\omega_o / \omega_1)} \times \left\{ 20 \log(\omega_o) \log(\gamma_2 |1 + H_N|_{\omega=\omega_1}) - \log(\omega_1) \log(\gamma_1 |1 + H_N|_{\omega=\omega_o}) - \log(\omega_1) \log(\Delta G) \right\} \quad (2B)$$