

# 광 픽업용 레버 구동기의 해석

한창수\* (한국기계연구원), 김수현\*\* (한국과학기술원)

## Analysis of lever actuator for the optical disk

Chang Soo Han\* (KIMM) and Soo Hyun Kim\*\* (KAIST)

### ABSTRACT

The proposed lever actuator has no friction and mass balance characteristics in motion, which are adapt to high-speed and high-density optical disk system. This paper discussed about the theoretical analysis of the lever structure. The modeling of the lever actuator is found Using the Newton's method, the motion of equation is deduced through the constraint equations and equilibrium equations in three directions (focusing, tracking and tilting). From the above analysis, we know that the shape of the hinge is the very important parameter on determining the performance of the lever actuator, and the actuator has the 2nd order system characteristics. And the first resonant frequency in transmissibility is dependent to the rigidity of the lever while the first transmissibility resonance of conventional actuators is dependent to the first natural resonance of those actuators. This means that the lever actuator is more stable to the external vibration.

**Key Words :** Optical disk (광디스크), Pickup actuator (픽업 구동기), Lever actuator (레버 구동기), Flexure hinge (탄성 힌지), FEM (유한요소법)

### 1. 서론

멀티미디어의 발달과 더불어 데이터 저장에 있어서 대용량화, 고속화가 요구되고 있으며, 저장 매체의 하나인 광디스크의 경우도 이 두 가지를 기본적인 개발방향으로 하여 많은 연구가 진행중이다<sup>(1)</sup>. 1990년도 후반에 등장한 DVD (digital versatile disk) 는 이를 반영한 광디스크 장치로서 디스크 1 장에 영화 1 편에 해당되는 동영상을 저장하기 위해 기존 CD 에 비해 고밀도와 고배속의 성능을 구현하였다<sup>(2)</sup>. 또한 CD-ROM (compact disk read only memory)에서는 데이터 전송 속도를 올리기 위한 배속향상의 경쟁이 계속되고 있다. 이 외에도 기록 밀도를 높이기 위한 청색레이저의 개발, 다중빔을 이용한 고배속에 관한 연구 등이 활발히 진행되고 있다. 이러한 고배속화 및 고밀도화에 부응하기 위해서는 기존에 사용되는 구동기보다 우수한 성능을 가진 픽업 구동기가 요구된다. 본 논문에서는 이전 논문에서 제안한 차세대에 적합한 광디스크용 레버 구동기에 대한 해석을 수행하였다<sup>(3)</sup>.

이론적인 해석을 통해 운동방정식을 유도하고, 이 레버 구동기의 설계변수에 대한 고찰 및 운동특성에 대해 논의하였다.

### 2. 레버 구동기의 해석

#### 2.1 레버 구동기의 이론적 해석

레버 구동기의 기본 구조는 Figure 1 과 같다.

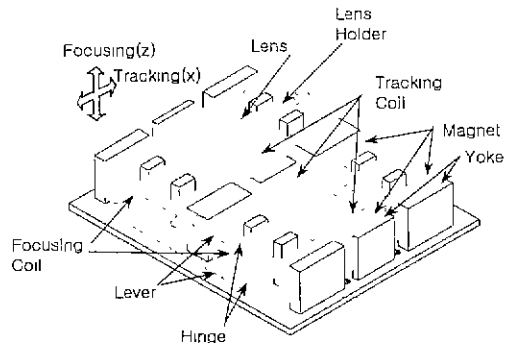


Fig.1 Concept design of the lever actuator

제시된 레버 구동기가 2 축으로 구동한다고 할 때, 각 축방향을 서로에 대해 상사성(similarity)을 가지고 있으므로 포커싱 방향에 대해서만 구동기의 운동 방정식을 구하였다.

먼저, Figure 2 에서 제시된 레버 구동기의 힌지 부분의 2 축 방향으로의 연성(compliance)은 다음과 같이 주어진다<sup>(4)</sup>.

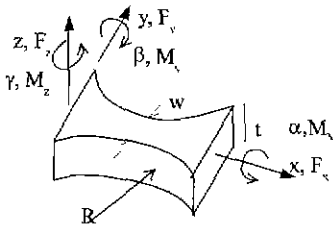


Fig. 2 Definition of the symbol in flexure hinge

$$c_x = \frac{\Delta\alpha}{M_x} = \frac{1}{M_x} \int_x \frac{M_x(x)dx}{GJ_s(x)} \cong \frac{1}{Gt^2wk_1} f_1(\delta) \quad (1)$$

$$c_z = \frac{\Delta\gamma}{M_z} = \frac{1}{M_z} \int_x \frac{M_z(x)dx}{EI_z(x)} \cong \frac{12}{Ew^3t} f_1(\delta) \quad (2)$$

이때,  $f_1(\delta) = \frac{1}{(2+\delta)^2} \left[ \frac{3+4\delta+2\delta^2}{2(1+\delta)} + \frac{3(1+\delta)}{\sqrt{\delta(2+\delta)}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{2+\delta}{\delta}} \right]$

t: hinge height, w: hinge thickness, R: hinge radius  
E: elastic modulus, G: shear modulus, k<sub>1</sub>: geometric related constant depending on the ratio t/w

각 방향에 대한 최대응력은 원형 힌지의 경우 폭이 가장 좁아지는 부분에서 일어나며, 이때 두 방향에 대해 다음과 같은 식으로 주어진다.

[z 방향 bending]  $(\sigma_{max})_z = \frac{6M_z}{tw^2} \quad (3)$

[x 방향 twisting]  $\tau_{max} = \frac{M_x}{k_2tw^2} \quad (4)$

이 때, k<sub>2</sub>는 힌지 부분의 기하학적 형상에 따라 결정되는 계수이다 이 최대응력은 힌지 설계의 제한 조건으로서 선정된 힌지 재료의 허용응력을 넘지 않도록 설계되어야 한다. 레버 구동기 전체에 대한 모델링의 개념도는 Figure 3 과 같이 주어진다.

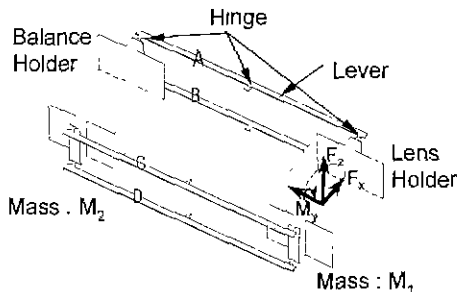


Fig. 3 The modeling of lever structure

이 구동 시스템을 해석하기 위해서 구동부의 회전량은 없으며, 홀더 부분의 강성은 매우 크다고 가정하였다. 한 방향의 홀더에 대한 힘과 모멘트 다

이어그램(Diagram)은 Figure 4 와 같이 주어지며, 각각 모멘트 평형과 힘 평형 조건에 의해 다음 식을 구할 수 있다.

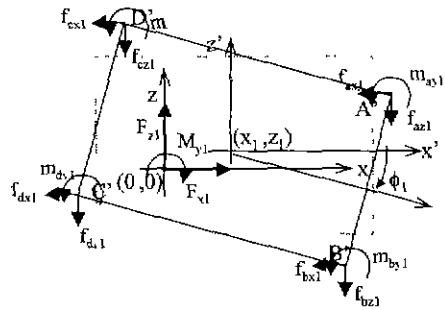


Fig. 4 Freebody diagram of the lens holder

$$\sum M_o = J_o \ddot{\phi}_1$$

$$= M_{y1} - (m_{ay1} + m_{by1} + m_{cy1} + m_{dy1}) - (V - H\phi_1)f_{ax1} \quad (5)$$

$$+ (V + H\phi_1)f_{bx1} - (V + H\phi_1)f_{cx1} + (V - H\phi_1)f_{dx1}$$

$$+ (H + V\phi_1)f_{ay1} + (H - V\phi_1)f_{by1} - (H + V\phi_1)f_{cy1}$$

$$- (H - V\phi_1)f_{dy1}$$

$$\sum F_x = M_1 \ddot{x}_1 = F_{x1} - (f_{ax1} + f_{bx1} + f_{cx1} + f_{dx1}) \quad (6)$$

$$\sum F_z = M_1 \ddot{z}_1 = F_{z1} - (f_{az1} + f_{bz1} + f_{cz1} + f_{dz1}) \quad (7)$$

여기서 f는 내력(internal force)을 나타내며, F, M은 외력을 나타낸다. 첨자 1은 첫번째 홀더(렌즈 홀더)임을 표기한 것이다. 다음은 하나의 레버에 대한 자유도(Freebody diagram)을 Figure 5 에 나타내었다. 이상적으로 레버의 연결부분이 강체라고 하면 렌즈 홀더의 구동력이 전부 발란스 홀더에 전달되지만 실제로는 레버의 연결부재가 유연하기 때문에 변위나 힘의 전달에서 손실이 발생한다. 따라서 레버의 연결부분을 강체(rigid)라고 놓지 않고 유연하다고 가정하고 해석하는 것은 실제 레버를 제작할 때, 어느 정도로 연결부재의 두께를 정할 기준을 마련하기 위한 것이다.

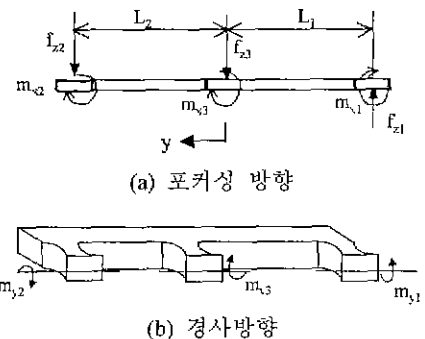


Fig. 5 Freebody diagram of the lever

결국 이 부분에 대한 해석을 통해 레버의 연결부재에 대한 설계 변수를 찾고자 하는 것이다. 이 레버에 대해서 힘 평형 및 모멘트 평형을 고려하여 다음과 같은 식을 구할 수 있다

$$\sum F_z = f_{z1} - f_{z2} - f_{z3} = 0 \quad (8)$$

$$\sum M_0 = L_1 f_{z1} + L_2 f_{z2} - m_{x1} - m_{x2} - m_{x3} = 0 \quad (9)$$

$$\sum M_0 = m_{y1} - m_{y2} - m_{y3} = 0 \quad (10)$$

이 때,  $f_{z1}, f_{z2}, f_{z3}$ : 레버의 각 위치에서 받는 힘의 크기,  $m_{x1}, m_{x2}, m_{x3}$ : 레버의 각 위치에서 받는 모멘트의 크기,  $m_{y1}, m_{y2}, m_{y3}$ : 경사방향으로 구동할 때 레버가 받는 모멘트의 크기를 나타낸다. 위 레버에서의 구속 조건은 다음과 같다.

$$\theta_{z1} = \theta_z(-L_1) = \frac{m_{x1} L_1}{EI_x} - \frac{L_1^2 f_{z1}}{2EI_x} + \theta_{z0} = -c_{x1} m_{x1} \quad (11)$$

$$\theta_{z2} = \theta_z(L_2) = \frac{m_{x2} L_2}{EI_x} - \frac{L_2^2 f_{z2}}{2EI_x} + \theta_{z0} = -c_{x2} m_{x2} \quad (12)$$

$$\theta_{z0} = \theta_z(0) = -c_{x3} m_{x3} \quad (13)$$

이와 같이 구속조건과 주어진 평형방정식을 미지수에 대해 연립하여 풀면 다음과 같은 운동 방정식을 구할 수 있다. 여기서 트래킹 방향은 포커싱 방향과의 상사성으로 인해 쉽게 구할 수 있다.

(포커싱방향)

$$\text{Lens: } M_1 \ddot{z}_1 + K_{z11} z_1 + K_{z12} z_2 = F_{z1} \quad (14)$$

$$\text{Balance: } M_2 \ddot{z}_2 + K_{z21} z_1 + K_{z22} z_2 = F_{z2} \quad (15)$$

이 때,  $K_{zj} = 4k_{zj}$  ( $i=1,2, j=1,2$ )

(트래킹방향)

$$\text{Lens: } M_1 \ddot{x}_1 + K_{x11} x_1 + K_{x12} x_2 = F_{x1} \quad (16)$$

$$\text{Balance: } M_2 \ddot{x}_2 + K_{x21} x_1 + K_{x22} x_2 = F_{x2} \quad (17)$$

이 때,  $K_{xy} = 4k_{xy}$  ( $i=1,2, j=1,2$ )

(경사방향)

$$\text{Lens: } J_{y1} \ddot{\phi}_1 + (K_{y11} + VK_{x11} + HK_{z11}) \phi_1 + (K_{y12} + VK_{x12} + HK_{z12}) \phi_2 = M_{x1} \quad (18)$$

$$\text{Balance: } J_{y2} \ddot{\phi}_2 + (K_{y21} + VK_{x21} + HK_{z21}) \phi_1 + (K_{y22} + VK_{x22} + HK_{z22}) \phi_2 = M_{x2} \quad (19)$$

이 때,  $K_{yy} = 4k_{yy}$  ( $i=1,2, j=1,2$ )

전체적으로 레버 구동기는 이전 논문에서 레버의 연결부재가 강체인 경우에 2 차 시스템으로 간략히 모델링 된 것처럼 2 차 시스템으로 운동 방정식이 모델링이 되며 이것은 픽업 구동기용으로 적합한 동역학적 구조이다.

다음으로 레버 구동기를 고정된 부분에서 가진 했을 때의 진동 전달률에 대해 구하였다.

Figure 6 은 가진 시의 자유도를 나타낸다

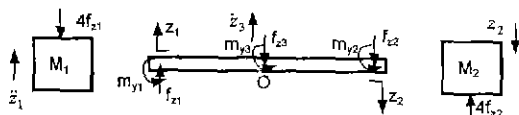


Fig. 6 Freebody diagram in case of base vibration  
각각의 홀더에 대한 운동 방정식을 이용해 라플라

스 변환 (Laplace Transform)을 통한 전달함수를 구하면 다음 식과 같이 구해진다

$$\frac{Z_1}{Z_3} = \frac{(M_1 s^2 + K_{z22})(K_{z11} - K_{z12}) - K_{z12}(K_{z21} - K_{z22})}{(M_1 s^2 + K_{z11})(M_2 s^2 + K_{z22}) - K_{z12} K_{z21}} \quad (20)$$

$$\frac{Z_1}{Z_3} = \frac{(M_1 s^2 + K_{z11})(K_{z22} - K_{z21}) - K_{z21}(K_{z11} - K_{z12})}{(M_1 s^2 + K_{z11})(M_2 s^2 + K_{z22}) - K_{z12} K_{z21}} \quad (21)$$

이상적인 경우, 즉 레버의 연결 부분의 강성이 무한대인 경우에는  $Z_1/Z_3=1, Z_2/Z_3=1$  이 되어 레버 구동기가 외부 진동에 대해 영향을 받지 않는 성능을 가지게 된다.

## 2.1 레버 구동기의 이론적 해석

광 픽업 구동기는 여러 가지 조건에 의해 구동 성능이 다르게 설계되어야 한다. 휴대형 광 저장기기의 경우는 높이와 소비 전력이 가장 중요하며, 독립형(stand-alone)의 경우는 가격이 가장 중요한 설계 변수가 된다. 그리고 광디스크의 회전속도와 디스크의 기록밀도에 따라 광 픽업 구동기는 각각 다른 성능을 가져야 한다<sup>(5)</sup>. 따라서 해석한 결과를 통해 구동기의 각 설계 변수와 성능과의 관계를 살펴볼 필요가 있다. 이 해석을 위해 사용된 스프링(Be-Cu)의 물성치는 다음과 같다.

Table 4-1. Specifications of Be-Cu (C1720-1/4HM)

Description	Abbreviation	Value
Elastic Modulus	E	$1.1 \times 10^5 [\text{N/mm}^2]$
Density	$\rho$	$8.23 [\text{g/cm}^3]$
Poisson's ratio	$\nu$	0.3
Tensile Strength	$\sigma_t$	$1205 [\text{N/mm}^2]$
Yield Strength	$\sigma_y$	$895 [\text{N/mm}^2]$

Figure 7 은 포커싱 방향에 대해 설계변수와 구동기의 1 차 공진 주파수와와의 관계를 나타낸 것이다.

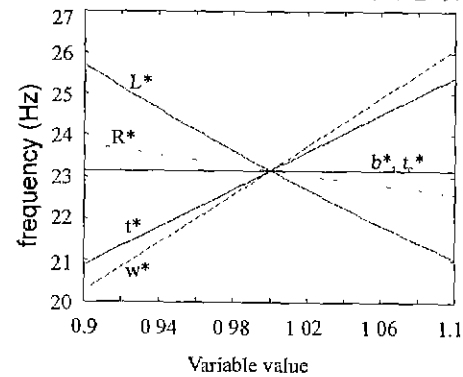


Fig. 7 Sensitivity analysis of dimensionless variables

포커싱과 트래킹에 대해 1 차 공진 주파수에 가장 민감한 설계변수대로 나열하면 다음과 같다.

$$\text{Focusing: } w > t > L > R > b > t_e \quad (22)$$

$$\text{Tracking: } w > L > t > R > b \approx t_e \quad (23)$$

이 때,  $t_e$  는 레버의 연결부분의 보강재의 두께이고,

L 은 레버의 길이이다. 이것은 힌지의 형상을 변경하여 픽업 구동기를 설계하는 것이 적절함을 보여준다. Figure 8 은 광 픽업 구동기의 기본 성능을 고려한 설계 변수를 선정했을 때의 포커싱, 트랙킹 및 경사 방향의 주파수 응답특성은 다음과 같은 형태로 나타난다

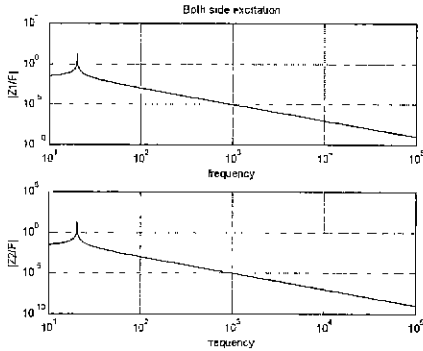


Fig 8 Frequency response plot of the lever actuator 즉, 1 차 공진 주파수가 100Hz 미만에 있는 전형적인 2 차 시스템의 특성을 가진다. 또한 레버 구동기는 외란에 대해 구조적으로 안정된 특성을 지니고 있다. Figure 9 에서 레버 구동기의 외란에 따른 진동전달률을 나타내었다.

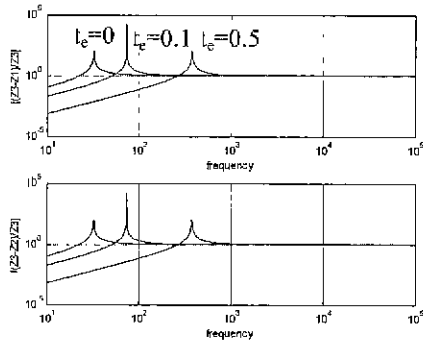


Figure 9. Transmissibility of the lever actuator

이 때, 진동 전달률의 1 차 공진 주파수까지는 외란에 대해 안정된 동특성을 가지게 되는데, 연결부재의 두께가 증가함에 따라 레버의 연결부분의 강성이 커지므로 진동전달률의 1 차 공진 주파수가 올라가게 된다

### 3. 결론

구동 시 마찰이 없어서 구동 선형성이 우수하며, 외란에 대해 안정된 구조인 레버 구동기에 대하여 구동기를 모델링하였다. 그리고 각각 홀더부와 가이드부에 대해 newton's method 를 이용해 Freebody diagram 을 그린 후 구속조건과 평형 조건을 이용해 운동방정식을 유도하였다. 또한 고정부에서 들어오는 진동에 대한 진동전달률을 구하였다.

구해진 수식을 통해 구동기의 설계 변수와 성능과의 관계를 해석하였다. 그 결과 레버 구동기는 포커싱, 트랙킹, 경사 방향으로 광 픽업 구동기에 적합한 2 차 시스템을 가지며, 진동전달률의 1 차 공진 주파수가 기존의 외팔보 방식의 구조에 비해 일등히 향상되는 것을 알 수 있었다. 추후로 유한요소법을 통한 해석과 실험을 통해 레버 구동기가 고밀도 및 고배속 구동기에 적용에 대해 연구할 것이다.

### 참고문헌

1. Shozo Saegusa and Shinobu Yoshida, "Mechatronics in optical head mechanism," Int. J. Japan Soc. Prec. Eng., Vol. 31, No.3, pp. 172 -176, 1997.
2. Masahara T. et al., "Special report (DVD vies with VCD)," NIKKEI Electronics, pp. 50 - 50, May 1990.
3. 한창수, 김수현, "차세대 광디스크용 레버 구동기의 설계," 한국정밀공학회추계학술대회, pp397-400, 2000.
4. J.M. Paros and L. Weisbord, "How to design flexure hinge," Machine Design. No. T-27, pp151-157, 1965
5. 한창수, 김수현, "고배속 및 고밀도 광 픽업 구동기를 위한 설계변수의 고찰," 한국정밀공학회추계학술대회, pp31-34. 2000.