

<논 문>

# 고배속 CD-ROM용 비대칭형 광픽업 미세구동기의 구동특성

## Actuating Characteristics of an Asymmetric Optical Pick-up Fine Actuator of a High Speed CD-ROM

고 상 선\* · 류 제 하\*\* · 박 기 환\* · 정 호 섭\*\*\*

Sangsun Go, Jeha Ryu, Kyi-hwan Park and Ho-seop Jeong

(1998년 1월 5일 접수 ; 1998년 3월 3일 심사완료)

**Key Words** : Optical Pick-up Fine Actuator(광픽업 구동기), Focusing Actuator(초점 구동기), Tracking Actuator(트랙 구동기), Sub-resonance(부공진)

### ABSTRACT

This paper presents actuating characteristics of an asymmetric high-speed optical pick-up fine actuator that can be installed in a small area such as a notebook personal computer. In the asymmetric actuator four points(mass center, actuation center, supporting point of wire suspension on a bobbin, and optical axis) are not coincident so that the proposed actuator suspension reveals undesirable suspension resonance in the pitch and yaw direction. Lumped parameter dynamic model in each direction is used to investigate the driving characteristics with respect to relative location of the four points. Some of desired design directions toward reducing resonance peaks are suggested by using sensitivity information. In order to avoid undesirable resonance, at least supporting point on the obbin must be located in the middle of the mass and actuation center of the asymmetric pick-up actuator.

### 1. 서 론

CD-ROM 광 픽업 구동기는 일반적으로 이송 구동기(feeding actuator 또는 coarse actuator)와 미세 구동기(fine actuator)로 이루어진다. 미세 구동기 및 광학부를 포함하는 이송 구동기는 선형 모터(linear motor), 회전모터(rotary motor)를 이용하여 구동되며, 트랙 영역의 넓은 운동이 필요

하므로 도달 시간(settling time)의 대부분을 차지한다. 미세 구동기(fine actuator)는 초점 구동기(focusing actuator)와 트랙 구동기(tracking actuator)로 구성되며, 높은 정밀도를 위해 이송 구동기와 직렬(tandem) 방식으로 구동 된다.

특히 고속 CD-ROM의 개발을 위해서는 미세 구동기의 높은 서보 대역(servo bandwidth)이 필요하다. 일례로 20배속 CAV(Constant Angular Velocity)형식의 CD-ROM 디스크는 4000 rpm으로 회전하며 미세 구동기는 디스크의 편심등의 영향으로 인한 외란을 이기려면 적어도 167 Hz의 서보 대역을 가져야 된다. 고전제어이론 통념상 이 주파수의 10배의 서보밴드를 확보할 수 있어야 제어안

\* 광주과학기술원 기전공학과 메카트로닉스 연구센터

\*\* 정 회원, 광주과학기술원 기전공학과

\*\*\* 삼성전기주식회사 종합연구소 광메카팀

정성을 보장할 수 있으므로, 현재의 고속 CD-ROM 드라이브 구동기는 2 kHz이상의 충분한 서보 대역과 감도를 떨어뜨리지 않는 한도에서 수십 Hz의 초점 방향(focusing direction)과 트랙 방향(tracking direction)의 저주파 공진 주파수를 갖도록 설계하여야 한다<sup>(1)</sup>. 또한 보빈 구조물의 유연성에서 기인하는 고차 공진은 수십 kHz에서 나타나는데 이는 제어 불가능한 모드이므로 서보 대역의 수배(5~10배)에서 나타나도록 설계한다<sup>(2~3)</sup>.

그런데, 노트북과 같이 설치 공간상의 제약을 받는 고속 CD-ROM의 미세 구동기는 저주파, 고주파의 공진외에 비대칭형의 보빈구조(bobbin structure)로 발생하는 부공진(sub-resonance : 수 kHz)이 구동 성능에 더욱 큰 영향을 미치게 된다. 이러한 부공진의 원인으로는 무게 불균형과 구동 중심의 불일치등이 알려졌으며<sup>(4)</sup>, 부공진의 크기를 줄이기 위해서 지터링(jittering) 방향의 회전관성을 크게하는 방법<sup>(5)</sup>과 비대칭 구동기의 부공진 모드에서 변위가 없는 특정 노드와 구동중심을 일치시키는 방법<sup>(6)</sup>, 그리고 서스펜션부의 강성을 바꾸어 주는 방법<sup>(7)</sup> 등이 제안되었다.

본 논문에서는 고속 CD-ROM용 비대칭형 미세 구동기의 부공진 발생 원인을 규명하기 위해 부공진 모드형상을 유한요소해석을 통하여 구하고, 미세 구동기의 구동 실험 결과를 토대로 단순한 2 자유도 동적 모델을 Lagrange 방정식을 이용하여 제시한다. 그리고 2 자유도 모델의 구동력에 대한 광축의 전달함수를 유도하고, 전달함수의 민감도 해석을 통하여 부공진에 큰 영향을 주는 파라미터를 찾아낸다. 그리하여 지지점, 질량중심, 구동중심, 광축(이하 개의 4중심점)의 불일치가 부공진에 미치는 영향을 파악하고, 부공진을 줄일 수 있는 미세 구동기(이하 구동기)의 설계방향을 제시한다.

## 2. 구동기의 고유 진동 특성

공진에 영향을 주는 모드를 구하기 위해 Fig. 1과 같은 대칭형 구동기의 고유진동 특성을 유한요소해석을 통하여 구하였다. Fig. 1에서  $Z_0$  축이 포커싱(Focusing),  $Y_0$  축이 트래킹(Tracking) 방향이다.

유한요소해석(ANSYS 5.1)<sup>(8)</sup>은 Fig. 2과 같은 코일 이동형(moving coil type)의 대칭형 광픽업 구동기를 가지고, 와이어 서스펜션은 보요소(beam44)로, 보빈은 고체요소(solid73)로 모델링하였다. 유한요소해석에 의한 고유진동특성은 Table 1과 같다.

모드형상 1부터 14까지는 서스펜션에 의한 것이며, 19는 보빈의 유연성(flexibility)에 의한 고주파 모드이다. 1, 2 번째 모드는 서보밴드 내에 있는

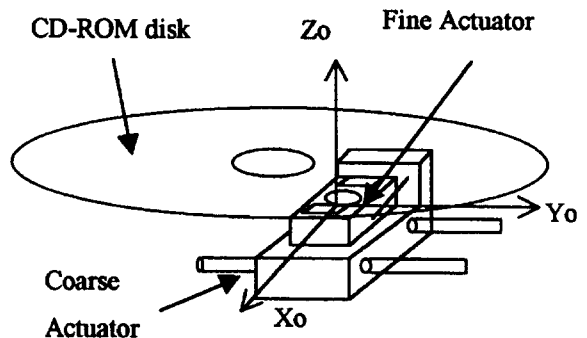


Fig. 1 Wire type symmetric pick-up actuator

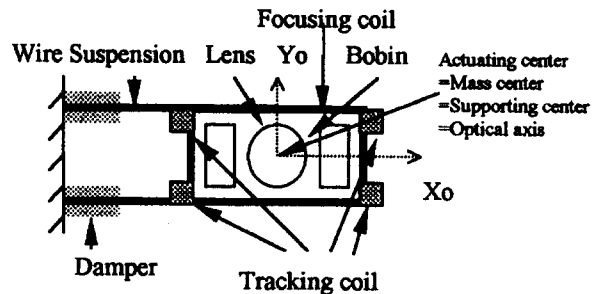


Fig. 2 Top view of a symmetric pick-up actuator

Table 1 Vibration characteristics of symmetric actuator with wire suspension

Mode No.	Frequency (Hz)	Mode-Shape
1. Focusing	39.8	
2. Tracking	40.0	
3. Rolling	66.2	
4. Pitching	2,204	
14. Yawing	5,575	
19. X Torsional (bobin flexibility)	35,446	

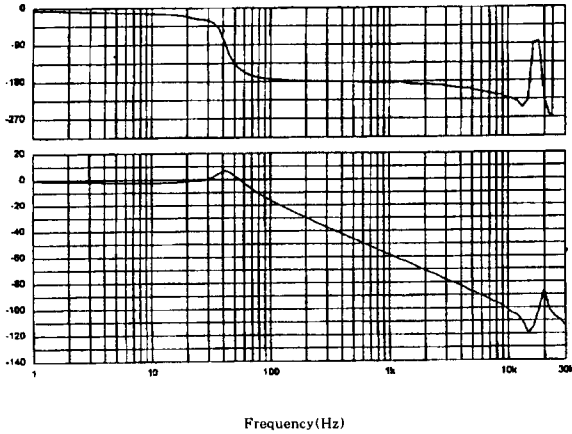


Fig. 3 Experimental actuating characteristics for focusing direction of a symmetric pick-up actuator

제어 가능한 자유도이나 나머지는 제어할 수 없는 자유도이다. 그러므로 3번째 이상의 모드는 가진되지 않거나 서스펜션에 적절한 감쇠기를 가지도록 설계해야한다. 4, 14번째 모드는 보빈의 피치(pitch)와 요(yaw)운동으로 대칭형에서는 Fig. 3의 실험 결과에서 보듯이 이러한 모드들이 가진되지 않아 부공진(sub resonance) 현상이 나타나지 않는다. 트래킹 방향에서도 Fig. 3과 같은 경향을 보인다. 이와 같이 대칭형 구동기에서 피치와 요 방향의 운동이 가진되지 않는 이유는 Fig. 2에서 보듯이 힘이 가해지는 구동중심(actuating center), 무게중심(mass center), 서스펜션의 지지점(supporting center), 광축(optical axis)의 위치가 모두 일치하도록 설계하기 때문이다.

### 3. 비대칭형 구동기의 모델링

광 픽업 구동기의 설치공간의 제약과 성능의 향상을 위해서는 높이와 무게를 줄여야 하므로, Fig. 4와 같이 대물 렌즈를 앞쪽에 두고 광원을 받도록 하면 비대칭적인 미세 구동기가 된다. 이때 비대칭적인 보빈의 형상으로 인해 구동기의 구동중심, 질량중심, 지지점 및 광축은 모두 다를 수 있다. Fig. 5는 제안된 비대칭 구동기의 포커싱 방향 동특성 실험 결과인데 1.4 kHz 에서 대칭형 구동기의 피칭 모드(pitching mode) 근방인 1~2 kHz 영역에서 공진이 나타남을 보여준다. 이와 같이 비대칭형 구동기의 네 개의 중심점들의 불일치는 보빈의 피칭(pitching)과 요잉(yawing)에 의한 포커싱 및 트래킹 방향의 공진을 명확히 발생시킨다.

따라서 구동기의 실험 특성을 토대로 초점방향의 간

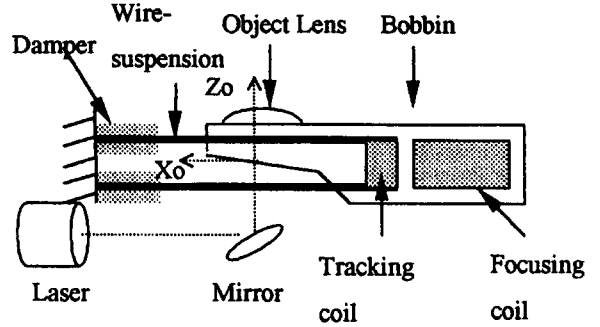


Fig. 4 Side view of an asymmetric pick-up actuator

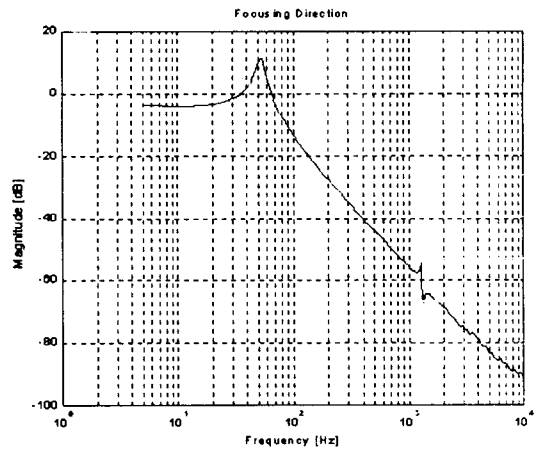


Fig. 5 Experimental actuating characteristics for focusing direction of an asymmetric actuator

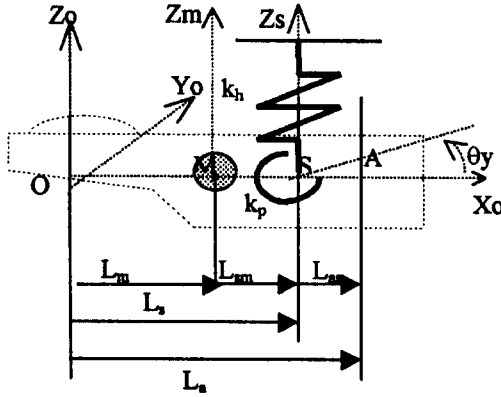
략화된 2자유도 모델의 운동방정식을 유도하고 구동력에 대한 전달 함수를 구하여, 전술된 네 개의 중심점의 불일치가 어떤 구동특성을 나타내는지 살펴보았다.

#### 3.1 구동력에 대한 피칭 및 광축 운동의 전달함수

비대칭형 구동기는 Fig. 6과 같이 포커싱 방향에 대해 단순화된 2자유도 모델로 나타낼 수 있다.

$L_m, L_s, L_a$ 는 광축(O)으로부터 각각 질량중심(M), 지지점(S), 구동중심(A)까지의 거리이다. 트래킹 방향에 대해서도 포커싱 운동과 비연성 되었다는 가정하에 비슷한 2자유도 모델로 나타낼 수 있다. 2자유도 모델은 Z축방향의 상하운동(첨자 h)과 Y축 회전운동(첨자 p)을 가지며, A, M, S, O점이 모두  $X_0$  축에 있다고 가정한다.

구동중심과 지지점간의 거리( $L_{as}$ ), 지지점과 질



A:actuating center M: mass center S:supporting center O: optical axis

Fig. 6 2 DOF model of an asymmetric actuator

량중심간의 거리( $L_{sm}$ ), 질량중심의 변화( $L_m$ )가 광축 운동에 미치는 효과와 동특성을 알아보기 위해  $Z_0$ 와  $\theta_y$ 에 대한 전달함수를 구하였다. 식 (1)과 같이 시스템의 Lagrangian<sup>(9)</sup>을 나타낼 수 있다.

$$L = \frac{1}{2}M\dot{Z}_m^2 + \frac{1}{2}J_m\dot{\theta}_y^2 - \frac{1}{2}k_h z_s^2 - \frac{1}{2}k_p \theta_y^2 \quad (1)$$

여기서  $J_m$ 은 질량중심 ( $M$ )에 대한 질량 관성 모멘트를 나타낸다. 작은 각  $\theta_y \ll 1$ 에 대한  $Z_m = Z_s - L_{sm}\theta_y$ 의 관계와 감쇠 효과, 구동중심에 작용하는 힘을 고려하면, Lagrange 방정식을 이용하여  $Z_s$ 와  $\theta_y$ 에 대한 운동방정식을 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} M & -ML_{sm} \\ -ML_{sm} & J_m + ML_{sm}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{z}_s \\ \ddot{\theta}_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_h & 0 \\ 0 & C_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{z}_s \\ \dot{\theta}_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_h & 0 \\ 0 & k_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_s \\ \theta_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f \\ L_{as}f \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서  $C_h$ 와  $C_p$ 는 감쇠기(damper)에 의한 선형 감쇠계수를,  $f$ 는 집중된 자기력을 나타내는데, 지지점과 질량중심이 일치하지 않으므로 질량 행렬이 연성되어 나타남을 알 수 있다. 식 (2)의 운동방정식으로부터 피칭 운동( $T_{\theta_y} = \frac{\Theta_y}{F}$ )과 광축 운동

( $T_{z_0} = \frac{Z_0}{F}$ )에 대한 전달함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_{\theta_y} = \frac{L_{as}(Ms^2 + C_h s + k_h) + ML_{sm}s^2}{(Ms^2 + C_h s + k_h)(J_s s^2 + C_p s + k_p) - M^2 L_{sm}^2 s^2} \quad (3)$$

$$T_{z_0} = \frac{[J_s + M\{L_s(L_{as} + L_{sm}) + L_{as}L_{sm}\}]s^2 + \{C_p + L_s L_{as} C_h\}s + \{k_p + L_s L_{as} k_h\}}{[(Ms^2 + C_h s + k_h)(J_s s^2 + C_p s + k_p) - M^2 L_{sm}^2 s^4]} \quad (4)$$

### 3.2 민감도 함수

Fig. 6의 A, M, O, S점의 위치 변화와 기타 다른 성분(보빈질량, 서스펜션의 감쇠와 탄성)의 변화가  $T_{z_0}$ 에 미치는 영향을 분석하기 위해 식 (4)로부터 다음 식 (5)에 정의된 민감도 함수<sup>(10)</sup>를 고려한다.

$$S_{\delta}^G(s) = \frac{d(\ln G)}{d(\ln \delta)} = \frac{\delta}{G} \left( \frac{dG}{d\delta} \right) \quad (5)$$

아래의 Table 2에는 제안된 비대칭형 구동기의 여러 파라미터에 대한 민감도 함수를 나타내었다.

여기서  $T=I/H$ 으로 나누어  $H$ 는 분모,  $I$ 는 분자 식으로 표현하였다. 이때  $L_{sm}, L_{as}, M, J_s, K_h, K_p$ 는 비대칭 구동기의 설계값들이며,  $C_h, C_p$ 는 실험치 결과를 통하여 구하였다.

## 4. 비대칭 구동기의 구동 특성 및 설계방향

### 4.1 민감도 해석 결과

Fig. 7을 보면  $K_p$ 가 부공진 부근(약 1.7 kHz)에서 가장 큰 민감도를 보이니  $K_p$ 를 변화시키기 위해서는 서스펜션의 기하학적 형상, 재료, 혹은 서스펜션 양단의 지지부 강성을 바꾸어야 한다.  $L_{sm}$

Table 2 Sensitivity function

Sensitivity	Sensitivity equation
1 $S_{L_m}^{T_{z_0}}$	$\frac{L_{sm}[M(L_{as} + L_s)sH - 2M^2 L_{sm}s^4 I]}{IH}$
2 $S_{L_{as}}^{T_{z_0}}$	$\frac{L_{as}[M(L_s + L_{sm})s^2 + L_s C_h s + L_s k_h]}{I}$
3 $S_{C_h}^{T_{z_0}}$	$\frac{C_h[L_s L_s H - I(J_s s^2 + C_p s + k_p)]s}{IH}$
4 $S_{C_p}^{T_{z_0}}$	$\frac{C_p[H - I(Ms^2 + C_h s + k_h)]s}{IH}$
5 $S_{K_h}^{T_{z_0}}$	$\frac{k_h[L_s L_{as} H - I(J_s s^2 + C_p s + k_p)]}{IH}$
6 $S_{K_p}^{T_{z_0}}$	$\frac{k_p[H - I(Ms^2 + C_h s + k_h)]}{IH}$

과  $L_{as}$ 는 나머지  $C_h, C_p, K_h$ 에 비해 매우 큰 영향을 끼치고,  $S$ 의 위치만으로서 조절이 가능하므로 부공진을 조정하기에 적당한 변수라 할 수 있다. 그리고  $C_h, C_p, K_h$ 는 저주파공진(1차 공진주파수 공진)에 영향을 미치거나, 부공진 주파수에 상대적으로 작은 영향을 끼침을 알 수 있었다.

**4.2 지지점 변화에 따른 동특성**

일단 비대칭형 구동기의 기하학적 보빈 형상이 결정되면 구동중심( $A$ ), 질량중심( $M$ )과  $O$ 간의 거리( $L_s, L_m$ )는 고정되므로 서스펜션 지지점( $S$ )과 광축( $O$ )의 거리( $L_s$ )만을 조절할 수 있다. Fig.8~12와 Table 3에 지지점( $L_s$ )의 5가지 위치에 대해 동특성시물레이션을 정리하였다. Fig. 8~12에서 실선이  $T_{zo}$ 를 점선이  $T_{\theta y}$ 를 나타낸다. Case I)~V)에서 공통적으로 저주파 공진은 42 Hz, 부공진은 1.7 kHz 에서 발생한다. 이때  $T_{\theta y}$ 는 질량중심( $M$ )과 지지점( $S$ )이 일치했을 때 피칭모드의 공진만이 발생하고 그 외의 경우 저공진과 부공진이 함께 발생한다.

Table 3을 보면 지지점을 광축에서부터 구동중심

**Table 3** Magnitude of sub-resonance along  $L_s$  [dB]

Case	$T_{zo}$	$T_{\theta y}$	Configuration of the relative positions
I)	-48	-63	$(O)S \text{---} (M) \text{---} (A) \rightarrow X$
II)	-52	-68	$(O) \text{---} S \text{---} (M) \text{---} (A) \rightarrow X$
III)	-63	-80	$(O) \text{---} (M)S \text{---} (A) \rightarrow X$
IV)	-90	-136	$(O) \text{---} (M) \text{---} S \text{---} (A) \rightarrow X$
V)	-64	-80	$(O) \text{---} (M) \text{---} (A)S \rightarrow X$

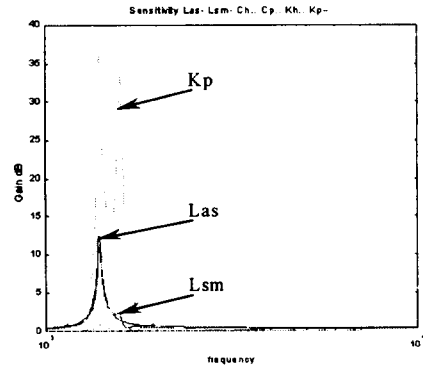
**Table 4** Magnitude of sub-resonance along  $L_m$

$L_{am}$ 증가량	$T_{zo}$	$T_{\theta y}$
0 %	-90 dB	-90 dB
10 %	-82 dB	-100 dB
20 %	-78 dB	-94 dB
30 %	-76 dB	-90 dB

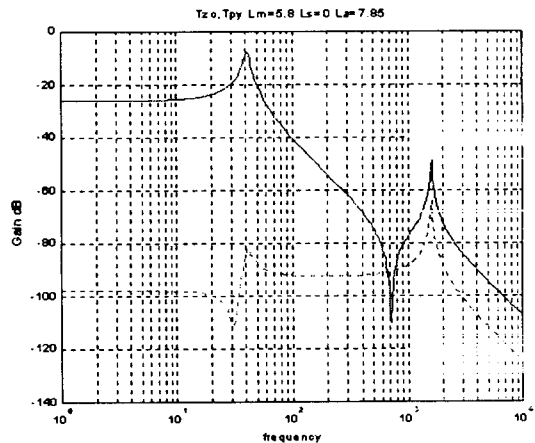
으로 이동시킬 때 부공진의 크기가 점차 감소하다가  $L_s=(L_a+L_m)/2$ 인 지점에서 급격히 감소한다. 즉  $L_s=(L_a+L_m)/2$ 일때, Fig. 11의 피칭 모드에 대한 전달함수( $T_{\theta y}$ )가 작게 되므로 광축의 전달함수에 영향을 미치지 못한다. 실제적으로 Fig. 4와 같은 형상을 갖는 비대칭 구동기는 구동중심( $A$ )과 질량중심( $M$ )을 일치시키기가 어려우므로 문제가 되는 피칭모드의 공진영향을 최소화 하기위해서 지지점( $S$ )을 구동중심( $A$ )과 질량중심( $M$ )의 중간점에 위치시키는 것이 효과적임을 알 수 있다.

**4.3 구동 중심과 질량중심거리에 따른 동특성**

식 (4)에서 보면 질량중심( $M$ )과 구동중심( $A$ )이 지지점( $S$ )과 일치할 경우( $L_{sm}=L_{as}=0$ ) 저주파 공진만 발생한다. 그리고  $S$ 와  $M$ ( $A$ )의 거리( $L_{sm}, L_{as}$ )가 멀어질수록 부공진의 크기가 커짐을 알 수 있다. 질량중심과 구동중심과의 거리에 따른



**Fig. 7** Sensitivity



**Fig. 8** Case I)  $L_s = 0$

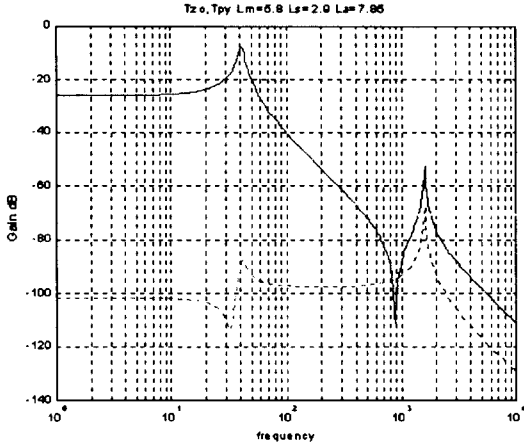


Fig. 9 Case II)  $L_s = L_m/2$

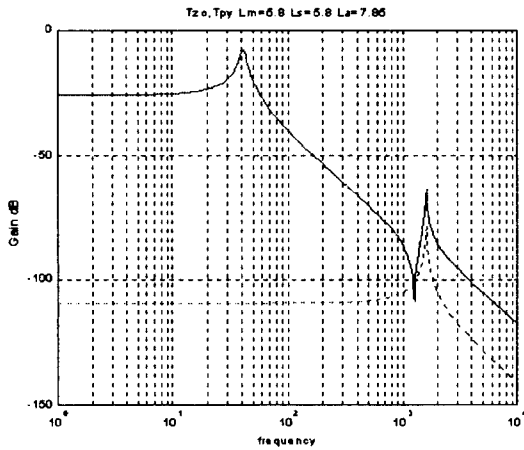


Fig. 10 Case III)  $L_s = L_m$

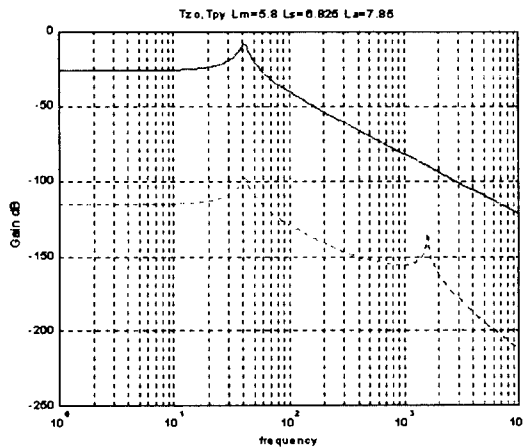


Fig. 11 Case IV)  $L_s = (L_a + L_m)/2$

부공진의 변화를 알아보기 위해  $M, A, S$ 가 일치된 형상을 기준으로  $M$ 과  $A$ 사이의 거리 ( $L_{am} = L_{as}$ )를 기준값(2.05 mm)의 10%씩 증가시키면서 부공진의 크기 변화를 관측한 것을 Table 4에 나타내었다. 이때 지지점( $S$ )은 질량 중심( $M$ )과 같다.

Table 4에서 보듯이  $M, A, S$ 가 일치하는 경우 피칭 운동이 나타나지 않으므로 광축에는 부공진이 나타나지 않는다. 그러나  $L_{am}$ 이 증가함에 따라 부공진의 크기가 점차 증가하는 것을 알 수 있다. 또한  $S$ 와  $A$ 를 일치시킨 후  $M$ 의 거리 ( $L_{sm} = L_{am}$ )를 증가시키면 마찬가지로 부공진의 크기가 점차 증가한다. 즉 질량중심, 구동중심과 지지점간의 불일치가 부공진의 크기를 증가시킨다.

결론적으로 네점의 불일치로 인해 제어 불가능한 피칭, 요잉 모드가 가진되고 따라서 부공진이 발생하므로 제어 불가능한 트래킹, 포커싱 모드를 앞에서 제시한 대로 네점의 적절한 위치배정으로 제거시키거나, 피칭과 요잉 모드의 감쇠율을 증가시킴으로써 부공진의 크기를 감소시킬 수 있다.

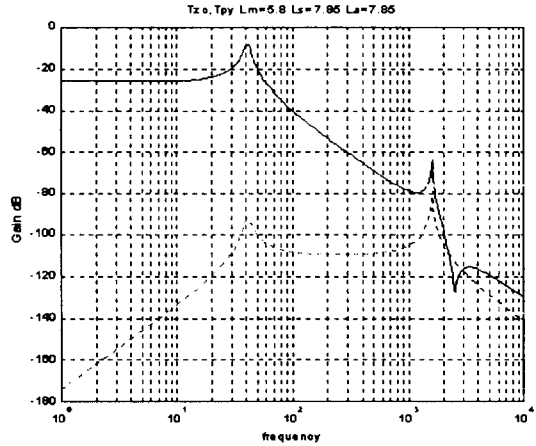


Fig. 12 Case V)  $L_s = L_a$

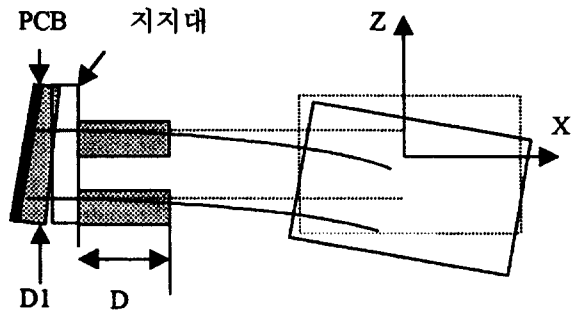


Fig. 13 Damper relocation for pitching mode peak reduction

예를 들어 피칭 모드의 감쇠를 증가는 다음과 같이 이룰 수 있다. Fig. 13에서 기존의 감쇠기는  $D$  영역에만 위치하여 수직 변위에 대한 감쇠 효과는 줄 수 있으나  $D$  부분의 회전 변위는 상대적으로 작으므로 피칭 성분의 감쇠 효과가 나타나지 않는다. 그러므로 PCB를 좀더 유연하게 설계하고 PCB와 지지대 사이의  $D1$  지점에 감쇠기(UV 코팅)를 설치함으로써 피칭 방향의 감쇠 효과를 가져올 수 있음을 실험을 통하여 확인하였다.

## 5. 결 론

대칭 구동기를 2자유도 시스템으로 모델링하고, 광축에 대한 전달함수를 통하여, 저주파공진과 부공진을 근사화하였다. 부공진을 제거하기 위해서는 질량중심, 구동중심, 지지점을 일치시키거나, 질량중심과 구동중심을 일치시키지 못 할 경우에는 질량중심과 구동중심의 중간에 지지점을 위치해야 한다. 부공진은 피칭과 요잉모드의 가진에 의해 발생하므로 서스펜션 고정단의 PCB를 좀더 유연하게 설계하고, PCB와 지지대 사이에 감쇠기를 설치함으로써, 두 모드에 대한 감쇠 효과를 높이고 회전 변위를 줄일 수 있다. 비대칭 구동기의 단순화된 2자유도 모델을 이용한 구동 특성과 부공진 현상의 규명은 새로운 비대칭 구동기 설계를 위한 기초 자료로 사용될 수 있다.

## 후 기

본 연구는 삼성전기(주)의 지원을 받아 수행되었으며 이에 관계자에게 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

(1) 이문구, 권대갑, 1997, 광픽업 미세구동부의 최적설계, 대한기계학회 논문집 제 21 권 제 5

호, pp. 819~829.

- (2) Hideo Ohnuki, Yukio Fukui, Nobutaka Ohnuki, and Masayuki Inoue, 1982, Three-Dimensional Actuator for Optical Head, SPIE Vol.329, pp. 103~108.
- (3) Tetsu Yamamoto, Takashi Yumura and Hiroo Shimegi, 1986, Development of High Performance Head Positioner for an Optical Disk Storage System, SPIE Vol. 695, Optical Mass Data Storage II, pp. 153~159.
- (4) 임경화, 이용훈, 김석중, 이재원, 1995, 고밀도 기록용 광픽업의 Actuator 동특성, 한국소음진동공학회, 1995년도 춘계학술대회논문집, pp. 258~263.
- (5) Nobuo Takeshita, Teruo Fujita and Kenjiro Kime, 1995, Dynamic Characteristics of Lens Actuator for Digital Video Disc, SPIE Vol. 2514, pp. 159~166.
- (6) Junichi Ichihara, Koichi Tezuka and Koichi Ogawa, 1992, Development of Actuators for Small-Size Magneto-Optical Disk Drives, Jpn J. Appl. Phys. Vol. 31, pp 519~523.
- (7) Makoto Nagasato and Isao Hoshino, 1996, Development of Two-Axis Actuator with Small Tilt Angles for One-Piece Optical Heads, Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 35, pp. 392~397.
- (8) Swanson Analysis System Inc., 1994, ANSYS Users Manual for Revision 5.1.
- (9) William T. Thomson, 1993, Theory of Vibration with Application, Fourth Edition, Prentice Hall, pp. 215~228.
- (10) John J. D'Azto, Constantine H. Houpis, 1988, Linear Control System Analysis and Design, 3rd Edition, pp. 492~499.