

# 수학적 전개에 의한 픽업 액추에이터의 진동 분석

## A Mathematical Approach for Vibration Analysis of a Pickup Actuator

이 경택<sup>†</sup>  
Kyung Taek Lee

(Received September 7, 2012 ; Revised October 17, 2012 ; Accepted October 17, 2012)

**Key Words :** Characteristic Equation(특성방정식), Pure Axial Vibration(순수축진동), Coupled Axial-bending Vibration(축-굽힘연성진동), Actuator(액추에이터), Focusing Mode(포커싱모드), Pitching Mode(피칭모드)

### ABSTRACT

This paper analyzes the vibration characteristics of an optical pickup actuator, which has six wire-suspensions and is used in optical disc drives(ODDs). The vibration characteristics of the actuator is mathematically described by analyzing its beam configuration and motion condition confined to lateral and longitudinal directions of the beams. The accuracy of the vibration characteristics is proved by comparing mode frequencies with a finite element analysis. Finally, it is shown that mode frequencies and shapes can be modified by changing design parameters in mathematical expressions.

### 기 호 설 명

- $s$  : Beam 번호
- $l$  : Beam 길이
- $A_s$  :  $s$ 번째 빔의 단면적
- $I_s$  :  $s$ 번째 빔의 단면 2차 모멘트
- $\rho_s$  :  $s$ 번째 빔의 밀도
- $E_s$  :  $s$ 번째 빔의 탄성계수
- $m$  : 끝단 강체의 질량
- $a, c$  : 끝단 강체의 중심과 첫 번째 빔 사이의  $x$ 축,  $y$ 축 방향 거리
- $k$  : 끝단 질량의 질량 중심을 통과하고,  $xy$ 평면에 수직인 축에 대한 끝단 질량의 회전 반지름(radius of gyration)
- $b_{s-1}$  : 첫 번째 빔과  $s$ 번째 빔 사이의  $y$ 방향 거리

- $u_s(x,t)$  :  $s$ 번째 빔의 축방향 변위(변형)
- $v_s(x,t)$  :  $s$ 번째 빔의  $y$ 방향 굽힘(deflection)
- $\omega$  : 라디안 고유진동수[rad/s]

### 1. 서 론

광픽업 액추에이터(actuator)는 대물렌즈를 구동하여 레이저 빔을 디스크에 정확히 맺히도록 하는 장치로서, 광디스크 드라이브의 핵심부품 중의 하나이다. CD 드라이브는 대물렌즈의 포커싱과 트래킹 동작을 위해 2축 액추에이터를 사용하고 있다<sup>(1)</sup>. DVD나 BD 드라이브에서는 포커싱(focusing)과 트래킹(tracking) 동작 외에 틸트(tilt) 동작을 포함하는 3축 액추에이터를 사용하고 있다<sup>(2,3)</sup>.

이 3축 액추에이터는 포커싱, 트래킹 및 틸트 방향으로 움직일 수 있도록 3방향으로의 자유도를

<sup>†</sup> Corresponding Author; Member, Korea National University of Education  
E-mail : ktlee@knue.ac.kr  
Tel : +82-43-230-3772, Fax : +82-43-230-3775

# A part of this paper was presented at the KSNVE 2012 Annual Spring Conference  
‡ Recommended by Editor Moon Kyu Kwak  
© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

가지게 설계되며, 가동부와 서스펜션을 갖추고 있다. 이 서스펜션은 가동부에 복원력을 주고 위치를 결정하기 위한 목적과 함께, 가동부의 구동을 위해 필요한 전기에너지의 공급을 위한 도선의 역할도 포함하고 있다. 따라서 통상 3축 구동 액추에이터는 6개의 서스펜션을 갖게 된다.

액추에이터의 성능은 광디스크 드라이브의 발전에 따라 지속적으로 개선되어져 왔는데, 특히 불필요한 운동(부공진)을 억제하고 필요한 운동을 강화하기 위한 노력이 중점이 되어왔다<sup>(4-7)</sup>. 이를 자세히 살펴보면, 액추에이터의 동작 중 포커싱, 트래킹 방향의 바운싱모드(bouncing mode) 진동을 극대화하고, 피칭(pitching), 요잉(yawing), 롤링(rolling) 모드 등 회전 모션이 가미된 진동 모드를 억제하려는 시도가 오랫동안 중요한 연구 테마였음을 알 수 있다. 그러나 이러한 진동모드에 대한 이해가 부족했기 때문에, 위의 학문적 노력에도 불구하고 실제 설계에서는 성능 분석 및 개선을 위해 유한요소해석프로그램(FEM 패키지)을 주로 이용해 왔다고 할 수 있다. 그러나 유한요소해석 프로그램으로 설계방향을 정하기 위해서는 액추에이터의 모델링과 해석, 그리고 구조변경에 따른 재모델링 및 재해석의 반복이라는 일반적인 해석 과정을 거쳐야 하기 때문에, 실제 수행은 상당한 시간적, 인적 자원을 요구한다고 할 수 있겠다. 그러므로 짧은 시간에 단순한 계산을 통해 구조변경의 방향 및 그 개선 결과를 얻을 수 있는 새로운 방안이 제시된다면 실제 설계에 매우 유용할 것이라고 생각된다.

이 연구에서는 6개의 와이어 서스펜션이 끝단강체에 의해 연결되어 있는 구조물의 진동특성을 수학적으로 분석했으며, 이를 통해 공진주파수 및 공진모드를 얻을 수 있는 특성방정식(characteristic equation)을 유도했다. 이 분석을 통해, 액추에이터의 포커싱방향의 저차 및 고차의 모드주파수(mode frequency)와 모드형상(mode shape)을 추출하였다. 이를 위해, 먼저 축-굽힘연성진동(coupled axial-bending vibration)에 국한된 특성방정식 혹은 특성행렬을 구하고 모드주파수를 얻었으며, 정확성을 검증하기 위해 동일 조건 하에서 수행된 FEM 해석결과와 비교되었다. 이 연구를 수행하는 과정에서 1차모드는 포커싱모드(focusing mode), 2차모드는 피

칭모드(pitching mode)가 된다는 것을 알 수 있게 된다. 이는 포커싱모드는 순수한 병진운동, 피칭모드는 순수한 회전운동으로 파악하고 있는 기존의 연구와 차이가 나는 것으로서, 이 연구의 결과는 포커싱 및 피칭모드가 빔의 축-굽힘연성진동(coupled axial-bending vibration)에 기인한 것이라는 것을 밝히고 있으며, 이는 수학적 전개에 의한 진동분석의 효과 중 하나라고 할 수 있겠다.

이 논문에서 제시한 결과는 광픽업 액추에이터의 설계에 직접 적용하여 모드 형상 및 모드 주파수를 빠르고 쉽게 구하는 데 적용될 수 있으며, 또한 설계변수(구조 및 재료의 물성) 중에서 진동특성의 변화에 영향이 큰 인자와 그 인자의 적절한 변경방향을 알게 해 준다.

## 2. 수학적 전개

Fig. 1과 같이 3축 광픽업 액추에이터는 6개의 서스펜션을 가지고 있는데, 좌우의 서스펜션을 합쳐서 하나의 빔이라 가정하면 3개의 평행한 빔이 끝단강체에 의해 연결되는 빔 구조물로 생각할 수 있다. 이 빔은  $x$ 축을 따라 줄어들거나 늘어날 수 있고,  $y$ 축을 따라 처질 수 있다고 가정한다. 따라서,  $x$ 축 방향 축변형  $u_s(x,t)$ 와  $y$ 축 방향으로의 굽힘변형  $v_s(x,t)$ 가 고려되어야 한다. 이 모델에서는 빔의 단면적이 매우 작은 경우로 국한하여, 빔의 전단변형에 의한 굽힘은 무시하기로 한다.

먼저 에너지 보존법칙에 의하면, 주어진 계의 운동에너지와 포텐셜에너지의 합은 항상 일정하다고 할 수 있다. 따라서

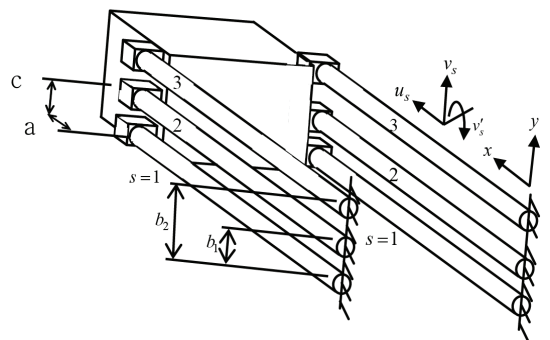


Fig. 1 Optical pickup actuator with six suspensions

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \sum_{s=1}^4 T_s + \sum_{s=1}^4 V_s \right) = 0, \tag{1}$$

여기에서  $s=1\sim 3$ 은 빔을 지칭하며,  $s=4$ 는 끝단강체를 의미한다. 모든 빔의 운동 및 포텐셜에너지는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\sum_{s=1}^3 T_s = \sum_{s=1}^3 \int_0^l \left[ \frac{1}{2} (\rho A)_s \{ \dot{u}_s^2(x,t) + \dot{v}_s^2(x,t) \} \right] dx, \tag{2}$$

$$\sum_{s=1}^3 V_s = \sum_{s=1}^3 \int_0^l \left[ \frac{1}{2} (EA)_s u_s'^2(x,t) + \frac{1}{2} (EI)_s v_s''^2(x,t) \right] dx. \tag{3}$$

끝단강체의 운동에너지식은 첫 번째 빔의 자유단의 운동과 강체의 기하학적인 조건을 이용하여 표현할 수 있다.

$$T_4 = (1/2) [ m \{ \dot{u}_1(l,t) - cv_1'(l,t) \}^2 + m \{ \dot{v}_1(l,t) + av_1'(l,t) \}^2 + Jv_1''^2(l,t) ], \tag{4}$$

여기에서  $J$ 는  $xy$ 평면에 수직인 방향이고, 끝단 강체의 질량중심을 통과하는 축에 대한 끝단강체의 질량 관성모멘트이며 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$J = mk^2, \tag{5}$$

여기에서  $k$ 는 회전반지름(the radius of gyration)이다. 따라서 식 (4)는

$$T_4 = \frac{1}{2} m \dot{u}_1^2 + \frac{1}{2} m \dot{v}_1^2 + \frac{1}{2} m (a^2 + c^2 + k^2) \dot{v}_1'^2 - mc \dot{u}_1 \dot{v}_1', \tag{6}$$

여기에서  $u_1 = u_1(l,t)$ ,  $v_1 = v_1(l,t)$  이다. 강체로 가정했기 때문에 끝단강체의 변형에 의한 포텐셜에너지는 무시한다( $V_4=0$ ).

경계조건은 다음과 같다.

$$u_s(0,t) = v_s(0,t) = v_s'(0,t) = 0, \quad s = 1 \sim 3. \tag{7}$$

그리고 빔의 자유단에 연결된 끝단강체를 고려하면 다음과 같은 연결조건(joint conditions)을 얻을

수 있다.

$$u_s(l,t) = u_1(l,t) - b_{s-1} v_1'(l,t), \quad s = 2, 3, \tag{8}$$

$$v_s'(l,t) = v_1'(l,t), \quad s = 2, 3, \tag{9}$$

$$v_s(l,t) = v_1(l,t), \quad s = 2, 3. \tag{10}$$

부분적분을 이용하고, 위 조건들을 사용하면 운동 및 포텐셜에너지의 시간미분식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \sum_{s=1}^4 T_s &= \sum_{s=1}^3 \int_0^l (\rho A)_s (\dot{u}_s \ddot{u}_s + \dot{v}_s \ddot{v}_s) dx_1 \\ &+ [m \ddot{u}_1 \dot{u}_1 + m \dot{v}_1 \ddot{v}_1 + m(a^2 + c^2 + k^2) \dot{v}_1' \ddot{v}_1' \\ &- mc \ddot{u}_1 \dot{v}_1' - mc \dot{u}_1 \ddot{v}_1' + ma \dot{v}_1 \ddot{v}_1' + m a \dot{v}_1' \ddot{v}_1]_{x=l} \end{aligned} \tag{11}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \sum_{s=1}^3 V_s &= \sum_{s=1}^3 \int_0^l \{ -(EA)_s u_s' \dot{u}_s + (EI)_s v_s'' \dot{v}_s \} dx_1 \\ &+ [ \sum_{s=1}^3 (EA)_s u_s' \dot{u}_1 - \sum_{s=2}^3 (EA)_s b_{s-1} u_s' \dot{v}_1', \tag{12} \\ &+ \sum_{s=1}^3 (EI)_s v_s'' \dot{v}_1' - \sum_{s=1}^3 (EI)_s v_s''' \dot{v}_1 ]_{x=l} \end{aligned}$$

여기에서  $v_s^{(4)} = \partial^4 v_s(x,t) / \partial x^4$  이다.

식 (11), (12)를 식 (1)에 넣으면 운동방정식 (13), (14) 및  $x=l$ 에서의 연속조건식(continuity condition equation) (15)~(17)을 얻게 된다.

$$\begin{aligned} \rho_s \ddot{u}_s(x,t) - E_s u_s''(x,t) &= 0, \quad 0 \leq x \leq l, \quad 0 \leq t, \\ s &= 1 \sim 3, \end{aligned} \tag{13}$$

$$\begin{aligned} (\rho A)_s \ddot{v}_s(x,t) + (EI)_s v_s^{(4)}(x,t) &= 0, \quad 0 \leq x \leq l, \\ 0 \leq t, \quad s &= 1 \sim 3, \end{aligned} \tag{14}$$

$$\left[ m \ddot{u}_1 - mc \dot{v}_1' + \sum_{s=1}^3 (EA)_s u_s' \right]_{x=l} = 0, \tag{15}$$

$$\left[ m \ddot{v}_1 + ma \dot{v}_1' - \sum_{s=1}^3 (EI)_s v_s'' \right]_{x=l} = 0, \tag{16}$$

$$\begin{aligned} [m(a^2 + c^2 + k^2) \dot{v}_1' - mc \dot{u}_1 + ma \dot{v}_1 \\ - \sum_{s=2}^3 (EA)_s b_{s-1} u_s' + \sum_{s=1}^3 (EI)_s v_s'' ]_{x=l} = 0 \end{aligned} \tag{17}$$

여기에서  $u_s = u_s(x, t)$ ,  $v_s = v_s(x, t)$  이다.

운동방정식 (13), (14)의 해는 다음과 같이 가정할 수 있다.

$$u_s(x, t) = u_s(x) \cos \omega t, \quad s = 1 \sim 3, \quad (18)$$

$$v_s(x, t) = v_s(x) \cos \omega t, \quad s = 1 \sim 3, \quad (19)$$

위 식을 이용하면 식 (7)~(10), (13)~(17)으로부터 시간 항을 제거할 수 있어서 다음과 같이 정리된다.

$$u_s''(x) + \beta_s^2 u_s(x) = 0, \quad 0 \leq x \leq l, \quad s = 1 \sim 3, \quad (20)$$

$$v_s^{(4)}(x) - \lambda_s^4 v_s(x) = 0, \quad 0 \leq x \leq l, \quad s = 1 \sim 3, \quad (21)$$

$$u_s(0) = v_s(0) = v_s'(0) = 0, \quad s = 1 \sim 3, \quad (22)$$

$$u_1(l) - u_s(l) - b_{s-1} v_1'(l) = 0, \quad s = 2, 3, \quad (23)$$

$$v_s'(l) = v_1'(l), \quad s = 2, 3, \quad (24)$$

$$v_s(l) = v_1(l), \quad s = 2, 3, \quad (25)$$

$$m\omega^2 u_1(l) - m\omega^2 v_1'(l) - \sum_{s=1}^3 (EA)_s u_s'(l) = 0, \quad (26)$$

$$m\omega^2 v_1(l) + m\omega^2 v_1'(l) + \sum_{s=1}^3 (EI)_s v_s''(l) = 0, \quad (27)$$

$$m(a^2 + c^2 + k^2)\omega^2 v_1'(l) - m\omega^2 u_1(l) + m\omega^2 v_1(l) + \sum_{s=2}^3 (EA)_s b_{s-1} u_s'(l) - \sum_{s=1}^3 (EI)_s v_s''(l) = 0, \quad (28)$$

여기에서  $\beta_s^2 = \omega^2 \left( \frac{\rho}{E} \right)_s$ ,  $\lambda_s^4 = \omega^2 \left( \frac{\rho A}{EI} \right)_s$  이다.

식 (20), (21)을 위한 해는 경계조건 (22)를 만족해야 하므로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$u_s(x) = B_s \sin \beta_s x, \quad s = 1 \sim 3, \quad (29)$$

$$v_s(x) = C_s (\cos \lambda_s x - \cosh \lambda_s x) + D_s (\sin \lambda_s x - \sinh \lambda_s x), \quad s = 1 \sim 3, \quad (30)$$

여기에서  $B_s, C_s$  과  $D_s$  는 모드 계수(modal coefficients)이다. 한편, 경계조건 (24), (25)로부터 다음과 같은 관계를 얻을 수 있다.

$$C_s = \Xi_s C_1 + \Psi_s D_1, \quad s = 2, 3, \quad (31)$$

$$D_s = \Gamma_s C_1 + \Pi_s D_1, \quad s = 2, 3. \quad (32)$$

위 식의 계수는 다음과 같다.

$$\Xi_s = \frac{\{\lambda_s(C-CH)_1(C-CH)_s + \lambda_1(S+SH)_1(S-SH)_s\}}{2\lambda_s(1 - \cos \lambda_s l \cosh \lambda_s l)},$$

$$\Psi_s = \frac{\{\lambda_s(S-SH)_1(C-CH)_s - \lambda_1(C-CH)_1(S-SH)_s\}}{2\lambda_s(1 - \cos \lambda_s l \cosh \lambda_s l)},$$

$$\Gamma_s = \frac{\{(C-CH)_1 - \Xi_s(C-CH)_s\}}{(S-SH)_s},$$

$$\Pi_s = \frac{\{(S-SH)_1 - \Psi_s(C-CH)_s\}}{(S-SH)_s},$$

여기에서  $(C \pm CH)_s = \cos \lambda_s l \pm \cosh \lambda_s l$ ,  $(S \pm SH)_s = \sin \lambda_s l \pm \sinh \lambda_s l$  이다.

해 (29), (30)을 조건식 (23), (26)~(28)에 대입하면 다음과 행렬식을 얻을 수 있다.

$$[a_{ij}] \{g_j\} = \{0\}, \quad i, j = 1 \sim 5. \quad (33)$$

이때 행렬  $[a_{ij}]$ 의 성분은 다음과 같다.

$$a_{11} = \sin \beta_1 l, a_{12} = -\sin \beta_2 l, a_{13} = 0,$$

$$a_{14} = b_1 \lambda_1 (S + SH)_1, a_{15} = -b_1 \lambda_1 (C - CH)_1,$$

$$a_{21} = \sin \beta_1 l, a_{22} = 0, a_{23} = -\sin \beta_3 l,$$

$$a_{24} = b_2 \lambda_1 (S + SH)_1, a_{25} = -b_2 \lambda_1 (C - CH)_1,$$

$$a_{31} = m\omega^2 \sin \beta_1 l - (EA)_1 \beta_1 \cos \beta_1 l,$$

$$a_{32} = -(EA)_2 \beta_2 \cos \beta_2 l, a_{33} = -(EA)_3 \beta_3 \cos \beta_3 l,$$

$$a_{34} = m\omega^2 \lambda_1 (S + SH)_1, a_{35} = -m\omega^2 \lambda_1 (C - CH)_1,$$

$$a_{41} = 0, a_{42} = 0, a_{43} = 0,$$

$$a_{44} = m\omega^2 (C - CH)_1 - m\omega^2 \lambda_1 (S + SH)_1$$

$$+ \sum_{s=1}^3 (EI)_s \lambda_s^3 \{ \Xi_s (S - SH)_s - \Gamma_s (C + CH)_s \},$$

$$a_{45} = m\omega^2(S - SH)_1 + ma\omega^2\lambda_1(C - CH)_1 - 6am\omega^2(EI)_1\lambda_1^2 \sin \beta_1 l \sin \lambda_1 l \sinh \lambda_1 l = 0, \quad (38)$$

$$+ \sum_{s=1}^3 (EI)_s \lambda_s^3 [\Psi_s(S - SH)_s - \Pi_s(C + CH)_s],$$

$$a_{51} = mc\omega^2 \sin \beta_1 l, a_{52} = -(EA)_2 b_1 \beta_2 \cos \beta_2 l,$$

$$a_{53} = -(EA)_3 b_2 \beta_3 \cos \beta_3 l,$$

$$a_{54} = m(a^2 + c^2 + k^2)\omega^2 \lambda_1(S + SH)_1$$

$$- ma\omega^2(C - CH)_1,$$

$$- \sum_{s=1}^3 (EI)_s \lambda_s^2 [\Xi_s(C + CH)_s + \Gamma_s(S + SH)_s],$$

$$a_{55} = -m(a^2 + c^2 + k^2)\omega^2 \lambda_1(C - CH)_1$$

$$- ma\omega^2(S - SH)_1$$

$$- \sum_{s=1}^3 (EI)_s \lambda_s^2 [\Psi_s(C + CH)_s + \Pi_s(S + SH)_s], \quad (34)$$

여기에서  $(C \pm CH)_s = \cos \lambda_s l \pm \cosh \lambda_s l$ ,  $(S \pm SH)_s = \sin \lambda_s l \pm \sinh \lambda_s l$ 이다. 모드 벡터는 다음과 같다.

$$\{g_j\} = \{B_1, B_2, B_3, C_1, D_1\}^T. \quad (35)$$

식(33)에서 해가 존재하기 위해서는 다음과 같은 조건이 필요하다.

$$\det[a_{ij}] = 0. \quad (36)$$

식(36)을 풀기 위해, 주어진 대상을 위한 실제 물성값을 대입하고 수학프로그램<sup>(8)</sup>을 사용하게 되면  $\omega$ (radian natural frequency)의 함수로 표현되는 특성방정식(characteristic equation)을 얻게 된다.

만약 3개의 빔의 모든 물성이 동일하고, 끝단강체의 중심에 대해 빔이 대칭적으로 배치된다면 행렬  $[a_{ij}]$ 의 성분은 간략화되어, 식(36)으로부터 다음과 같은 특성방정식을 얻을 수 있게 된다.

$$3(EA)_1 \beta_1 \cos \beta_1 l - m\omega^2 \sin \beta_1 l = 0, \quad (37)$$

$$(k^2 m^2 \omega^4 \sin \beta_1 l - 2\beta_1 m c^2 \omega^2 (EA)_1 \cos \beta_1 l)(1 - \cos \lambda_1 l \cosh \lambda_1 l) - 3(EI)_1 \lambda_1^3 \{m\omega^2(a^2 + k^2) \sin \beta_1 l - 2\beta_1 c^2 (EA)_1 \cos \beta_1 l\} (\sin \lambda_1 l \cosh \lambda_1 l + \cos \lambda_1 l \sinh \lambda_1 l) - 3m\omega^2 (EI)_1 \lambda_1 \sin \beta_1 l (\sin \lambda_1 l \cosh \lambda_1 l - \cos \lambda_1 l \sinh \lambda_1 l) + 9(EI)_1^2 \lambda_1^4 \sin \beta_1 l (1 + \cos \lambda_1 l \cosh \lambda_1 l)$$

상기 식은 대칭조건에 부합하도록  $c = b_2/2 = b_1$ 의 조건을 포함한 것이다. 식(37)은 보의 길이방향으로의 진동모드를 가리키는, 즉 순수축진동(pure axial vibration)을 위한 특성방정식이 되며, 이를 부록에서 별도로 증명하였다.

### 3. 정확성 검증

위에서 구한 특성방정식(38) 및 특성 행렬의 판별식(36)의 물리적 의미와 그 정확성을 증명하기 위해 실제 값을 사용하여 모드 주파수를 구해보고, 특별히 가동부 및 빔의 운동이  $xy$ 평면에만 허용된 조건 하에서 계산된 FEM결과와 비교해 본다. 다음은 이때 사용된 물성값이다.

$$\text{빔} : l=25 \text{ mm}, d_s=0.2 \text{ mm}, \rho_s=8250 \text{ kg/m}^3,$$

$$E_s=15 \text{ GPa},$$

$$\text{빔 configuration} : a=0.5 \text{ mm}, c=1.25 \text{ mm},$$

$$b_1=c, b_2=2c,$$

$$\text{끝단강체} : m=0.434 \times 10^{-3} \text{ kg}, J=1.752 \times 10^{-9} \text{ kg} \cdot \text{m}^3.$$

한편 빔이 가동부의 좌우에 배치되므로, 실질적으로는 빔단면적과 단면관성모멘트는 두 배로 계산해 주어야 한다.

$$A_s = 2 \times \pi d_s^2 / 4, I_s = 2 \times \pi d_s^4 / 64, s = 2, 3. \quad (39)$$

위에서 계산한 값들을 특성방정식(38)에 대입하면 Table 1에서와 같은  $\omega$ (radian natural frequency)를 얻을 수 있으며, FEM 결과와 비교하면 잘 맞는다는 것을 알 수 있다. Fig. 2는 FEM 해석으로부터 얻어진 모드형상을 1차부터 5차까지 보여주는 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 모드는 빔의 인장-압축 및 굽힘에 의한 끝단강체의  $xy$ 평면 운동과 동일 평면에 직각인 축을 중심으로 하는 끝단강체의 회전 운동으로 생각할 수 있다.

동일한 방법으로, 특성행렬의 판별식(36)도 그 정확성을 확인해 볼 수 있다. 위에서 제시한 각종 물성값에서, 빔을 다르게 하기 위해 아래와 같이 일부는 다른 물성값을 적용해 본다.

$$d_2=1.05d_1, d_3=1.1d_1, E_2=1.05E_1, E_3=1.05E_1.$$

**Table 1** Comparison of Eq. (38) and FEM result

	$\omega_1$	$\omega_2$	$\omega_3$	$\omega_4$	$\omega_5$
Equation (38)	109.6	2416.8	6559.4	8338.3	13121.3
FEM	108.9	2399.1	6515.7	8268.7	13006.2

**Table 2** Comparison of Eq. (36) and FEM result

	$\omega_1$	$\omega_2$	$\omega_3$	$\omega_4$	$\omega_5$
Equation (36)	123.3	2415.1	6627.7	8863.7	13068.8
FEM	121.7	2397.0	6578.5	8739.9	12955.9



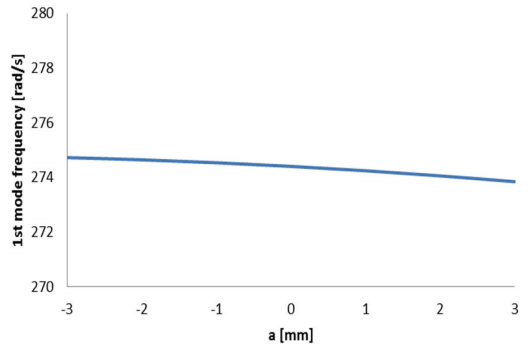
**Fig. 2** Mode shapes by FEM simulation

상기 조건에 의한 비교 결과는 Table 2에 나타나 있으며, 역시 FEM 결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

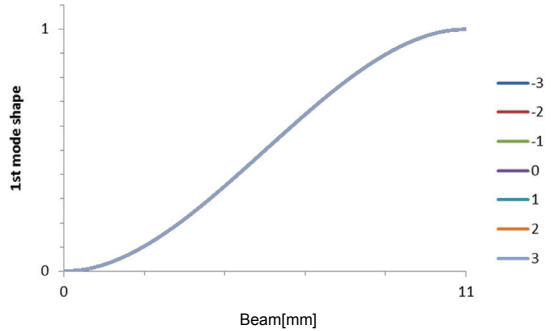
이상의 결과를 요약하면, 식 (38)은 동일 물성이며, 가동부에 대해 대칭적으로 배치된 3개의 빔을 갖는 구조물을 위한 축-굽힘연성진동(coupled axial-bending vibration)의 특성방정식임을 알 수 있다. 판별식 (36)도 역시 축-굽힘연성진동을 위한 특성방정식이 됨을 알 수 있다. 그리고 Fig. 2를 통해 첫 번째 모드는 포커싱모드가 되며, 두 번째 모드는 피칭모드임을 알 수 있다. 부연해서 설명하면, 포커싱, 피칭모드 공히 빔의 굽힘과 함께 빔의 길이 방향의 인장-압축에 의한 것이라고 하겠다.

**4. 결과의 응용**

위에서 구한 판별식 (36)을 이용하여, 상중하 서로



(a) 1st mode frequency



(b) 1st mode shape

**Fig. 3** 1st mode frequency and mode shape with respect to  $a$ (at  $c=2.5$ )

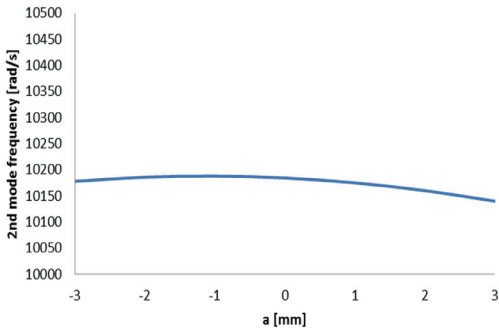
다른 물성을 갖는 6개의 서스펜션에 대물렌즈 가동부가 부착된 액추에이터 구조물의 진동모드를 분석하고자 한다.

6개 서스펜션은 3개의 빔으로 간주되어야 하므로, 우선 빔의 단면적과 단면 2차 모멘트를 식 (39)와 같이 한다. 그리고 진동모드에 의한 대물렌즈의 포커싱방향 자세(가동부의 병진, 회전 운동)를 분석하기 위해 몇 가지 설계변수를 변경하면서, 1번 빔의 모드방정식, 즉 진동모드를 구해본다. 진동모드는 정규화(normalization) 과정을 거쳐서 비교된다.

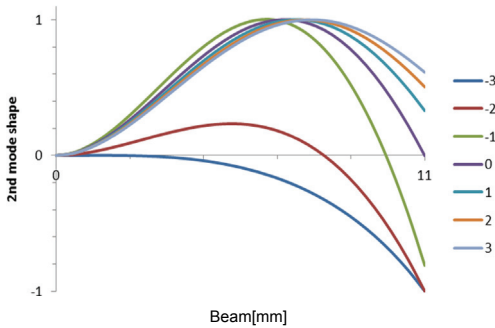
먼저 판별식 (36)을 푸는 과정에서 모드주파수(mode frequency)를 얻게 되면 식 (30)에 넣어서 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$v_1(x) = C_1 \{ (\cos \lambda_1 x - \cosh \lambda_1 x) - (a_{44} / a_{45})(\sin \lambda_1 x - \sinh \lambda_1 x) \} \quad (40)$$

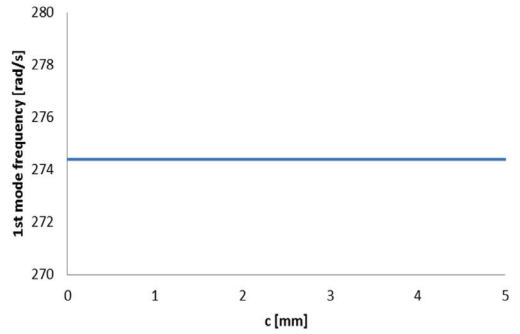
$$\bar{v}_1(x) = v_1(x) / \max \{ v_1(x) \} \quad (41)$$



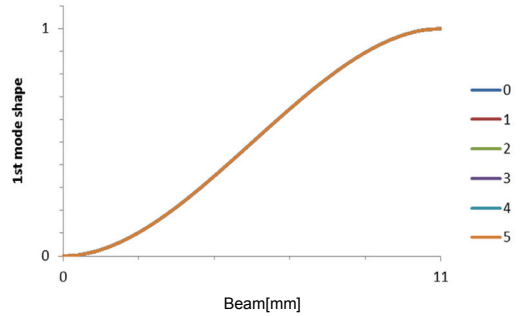
(a) 2nd mode frequency



(b) 2nd mode shape



(a) 1st mode frequency



(b) 1st mode shape

**Fig. 4** 2nd mode frequency and mode shape with respect to  $a$  (at  $c=2.5$ )

**Fig. 5** 1st mode frequency and mode shape with respect to  $c$  (at  $a=0$ )

식 (41)이 정규화된 모드방정식이다.

대상계의 물성값 및 검토 대상으로 삼은 설계변수와 변경 범위는 다음과 같다.

빔 :  $d_1=0.11$  mm,  $d_2=0.09$  mm,  $d_3=0.07$  mm,  
 $l=11$  mm,  $\rho_1=\rho_2=\rho_3=8250$  kg/m<sup>3</sup>,  $E_1=E_2$   
 $=E_3=127$  GPa,

끝단강체 :  $m=0.35 \times 10^{-3}$  kg,  $k=2 \times 10^3$  m<sup>2</sup>,

빔간격 :  $b_1=1$  mm,  $b_2=2$  mm,

설계변수의 변경범위 :  $a=-3 \sim 3$  mm,  $c=0 \sim 5$  mm.

먼저  $c=2.5$  mm로 고정한 상태에서  $a=-3 \sim 3$  mm의 범위 내에서 변경하면서, 판별식 (36)으로부터 모드주파수와 모드형상을 추출하고 이를 비교 관찰해 본다.

첫 번째, 두 번째 모드주파수(포커싱, 피칭모드 주파수)는 설계변수  $a$ 의 변화에 둔감함을 보여준다 (Fig. 3(a), Fig. 4(a)). 모드형상의 경우, 첫 번째 모드(포커싱모드)는 변화를 보이지 않는다(Fig. 3(b)). 그러나 두 번째 모드(피칭모드)는 큰 변화를 보여준다(Fig. 4(b)). 즉 두 번째 모드형상은 설계변수  $a$ 에 의해 독립적으로 조절이 가능함을 알 수 있다.

다음으로는  $a=0$ 으로 고정한 상태에서  $c=0 \sim 5$  mm의 범위 내에서 변경하면서, 판별식 (36)을 이용하여 모드주파수와 모드형상을 관찰해 본다. 첫 번째 모드주파수(포커싱모드 주파수)는 설계변수  $c$ 의 변화에 전혀 반응하지 않는 것을 알 수 있다(Fig. 5(a)). 그러나 두 번째 모드주파수(피칭모드 주파수)는 상당한 변화를 나타내는 것을 알 수 있다(Fig. 6(a)). 특히 이 모드주파수를 극대화하는 설계변수  $c$ 의 설계값이 존재한다는 것을 알 수 있다. 모드형상의 경우, 첫 번째 모드는 변화를 보이지 않는다(Fig. 5(b)). 그러나 두 번째 모드는 약간의 변화를 보여준다(Fig. 6(b)). 따라서 설계변수  $c$ 는 두 번째 모드주파수에만 다소 큰 영향을 준다는 것을 알 수 있다.

### 5. 결론

이 논문은 6 와이어 서스펜션을 갖는 광픽업 액추에이터를 수학적으로 모델링하여 진동모드와 관련된 특성방정식과 판별식을 제시하고 있다. 이 결과

를 이용하여 공진주파수 및 공진모드를 추출하였고, 이것들을 설계변수와 연관지어 그 변화추이를 시각적으로 보여주고 있다. 이를 통해 픽업 액추에이터의 공진주파수 및 공진모드의 변경이 가능하다는 것을 제시하였다.

후 기

이 논문은 한국교원대학교 2011학년도 KNUE 학술연구비 지원을 받아 수행하였음.

참 고 문 헌

(1) Nagasato, M. and Hoshino, I., 1996, Development of a Two-axis Actuator with Small Tilt Angles for One-piece Optical Heads, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 35, pp. 392~397.

(2) Zhang, B., Ma, J., Pan, L., Cheng, X. and Tang, Y., 2008, High Performance Three-axis Actuator in Super-multi Optical Pickup Actuator with Low Crosstalk Force, *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, Vol. 54, No. 4, pp. 1743~1749.

(3) Kim, S. J., Heor, T. Y., Kim, Y. K., Ahn, Y. M., Chung, C. S. and Park, S. H., 2005, High Response Twin-objective Actuator with Radial Tilt Function for Blu-ray Disc Recorder, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 44, pp. 3393~3396.

(4) Han, C. S., Seo, H. S., Lee, J. H., Won, J. H., Kim, S. H. and Kwak, Y. K., 1998, Study on Tilt of 4-Wire Actuator in Optical Disc, *Journal of the KSPE*, Vol. 15, No. 7, pp. 52~60.

(5) Jung, G. W., Lee, J. W., Lee, D. J., Park, N. C. and Park, Y. P., 2003, Improvement of Dynamic Characteristics for Optical Pickup Actuator using Finite Difference Scheme Automated Design Synthesis, *Transactions of the KSME A*, Vol. 27, No. 12, pp. 1997~2003.

(6) Yoon, Y. B., Shin, K. S., Nam, D. S. and Yang, Y. T., 2005, Development of 3-Axis Slim Actuator Using Moving Magnet and PCB, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 15, No. 2, pp. 156~160.

(7) Go, S. S., Ryu, J. H., Park, K. H. and Jeong, H.

S., 1998, Actuating Characteristics of an Asymmetric Optical Pick-up Fine Actuator of a High Speed CD-ROM, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 8, No. 2, pp. 346~352.

(8) Mathematica 6.5, Wolframe Research Inc., 2007.

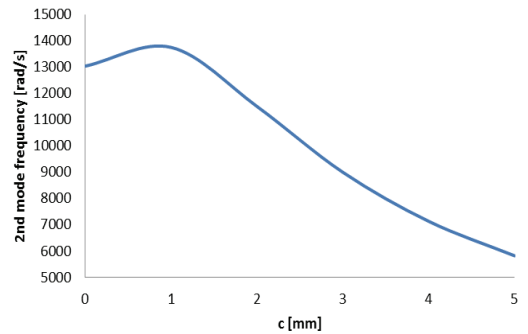
부 록

모든 빔이 동일한 물성값을 가질 경우, 보가 길이 방향으로 인장, 압축 변형만을 할 수 있는 조건이 되며, 이 경우에 대한 특성방정식을 유도해 본다. 먼저 앞 장에서 전개한 결과 중,  $u_s(x)$  운동만 정리해 보자.

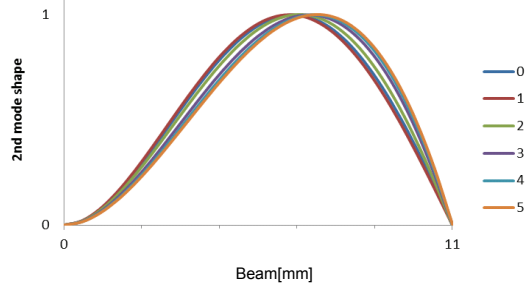
$$u_s''(x) + \beta_s^2 u_s(x) = 0, \quad 0 \leq x \leq l, \quad s = 1 \sim 3, \quad (A-1)$$

$$u_s(0) = 0, \quad s = 1 \sim 3, \quad (A-2)$$

$$u_s(l) = u_1(l), \quad s = 2, 3, \quad (A-3)$$



(a) 2nd mode frequency



(b) 2nd mode shape

Fig. 6 2nd mode frequency and mode shape with respect to c (at a=0)



$$m\omega^2 u_1(l) - \sum_{s=1}^3 (EA)_s u'_s(l) = 0, \quad (\text{A-4})$$

$$u_s(x) = B_s \sin \beta_s x, \quad s = 1 \sim 3, \quad (\text{A-5})$$

빔의 물성이 모두 같기 때문에  $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3$  이 된다는 것을 이용하면서, (A-2), (A-3) 조건을 식 (A-4)에 대입하면 식 (37)이 구해진다. 따라서 식 (37)은 순수축진동(pure axial vibration)에 관한 특성방정식이라는 사실을 알 수 있다.



**Kyung Taek Lee** received a Ph.D. degree in Mechanical Engineering from Yonsei University, Seoul, Korea in 2003. He had worked in LG Electronics from 1989 to 2011. He is a professor at Korea National University of Education.

His interests is in the area of microactuator design for information storages and mobile devices.