

# 수학적 전개에 의한 픽업 액추에이터의 진동 분석

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

이경택†  
Kyung Taek Lee

**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 study shows the vibration characteristics of an actuator with six wire-suspensions, used in optical pickups of optical disc drives (ODDs). In this paper, the vibration characteristics of this beam structure is induced mathematically. To obtain vibration modes of focusing direction, the vibration analysis is achieved in lateral and longitudinal directions of the structure. The accuracy of induced vibration characteristics is proved by comparing mode frequencies with a finite element analysis. Finally, it is shown that mode 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 2 차 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)
- $b_{s-1}$  : 첫번째 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 액추에이터는 대물렌즈를 구동하여 레이저 빔을 디스크에 정확히 맺히도록 하는 장치로서, 광 디스크 드라이브의 핵심부품 중의 하나이다. CD 드라이브의 경우는 대물렌즈의 포커싱과 트래킹 동작이 가능한 액추에이터를 사용한다<sup>(1)</sup>. DVD 나 BD 드라이브에서는 포커싱과 트래킹 동작 외에 틸트 동작을 포함하는 3 축 구동이 가능한 액추에이터를 사용한다<sup>(2, 3)</sup>.

이 3 축 액추에이터는 포커싱, 트래킹 및 틸트 방향으로 움직일 수 있도록 3 방향으로의 자유도를 가지게 설계되며, 가동부와 서스펜션을 갖추고 있다. 이 서스펜션은 가동부에 복원력을 주고 위치를 결정하기 위한 목적 외에, 가동부의 구동을 위해 필요

† 교신저자; 정회원, 한국교원대학교 기술교육과  
E-mail : ktleee@knue.ac.kr  
Tel : (043) 230-3772, Fax : (043) 230-3775

한 전기에너지의 공급을 위한 도선의 역할도 포함하고 있다. 따라서 일반적인 3축 구동 액추에이터는 6 개의 서스펜션을 갖게 된다.

액추에이터의 성능 향상을 위해 광픽업 액추에이터의 진동특성을 분석하고 개선하기 위한 노력이 지속되어왔다<sup>(4-6)</sup>. 특히 불필요한 운동(부공진)을 억제하고 필요한 운동을 강화하기 위한 연구가 집중되었다<sup>(4, 7)</sup>. 그러므로 액추에이터는 포커싱, 트래킹 방향의 바운싱모드(bouncing mode) 진동을 극대화하고, 피칭(pitching), 요잉(yawing), 롤링(rolling) 모드 등 회전 모션이 가미된 진동 모드의 억제가 오랫동안 중요한 연구 테마가 되어왔다. 그러나 진동 모드에 대한 이해가 부족했으며, 또한 상당히 제한된 조건에서 성립하는 조건식의 개발 등, 실제 적용에는 제한적이었다고 할 수 있다.

본 연구는 6 개의 와이어 서스펜션이 끝단강체에 의해 연결되어 있는 구조에 대한 공진 주파수 및 공진 모드를 수학적으로 계산해 보려는 것이다. 이 연구에서 수행하는 수학적 전개를 통해, 포커싱방향의 저차 및 고차의 모드주파수(mode frequency)와 모드형상(mode shape)을 추출할 수 있게 되며, 포커싱방향의 2 차모드가 피칭모드가 된다는 것을 알 수 있게 된다. 이 결과는 과거의 연구에서는 거의 다루어지지 않았다고 생각된다. 이를 위해, 먼저 특성방정식 혹은 특성행렬을 구하는데, 이는 축-굽힘연성 진동(coupled axial-bending vibration)에 관한 것이다. 이러한 결과는 동일 조건 하에 수행된 FEM 결과와 비교되어 그 정확성이 검증된다.

이 논문에서 제시한 결과는 광픽업 액추에이터의 모드 형상 및 모드 주파수를 구하는 데 적용될 수 있으며, 또한 설계변수(구조 및 재료의 물성)를 적절히 조절함으로써 진동주파수와 진동모드의 변화를 꾀할 수 있음을 보여준다.

## 2. 수학적 전개

Fig. 1 과 같이 3 축 광픽업 액추에이터는 6 개의 서스펜션을 가지고 있는데, 좌우의 서스펜션을 합쳐서 하나의 빔이라 가정하면 3 개의 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 방향으로의 굽힘  $v_s(x, t)$  가 고려되어야 한다. 이 모델에서 빔의 단면적이 매우 작은 경우로 국한하여, 빔의 전단변형에 의한 굽힘은 무시하기로 한다.

에너지 보존법칙에 의해, 주어진 계의 운동에너지와 포텐셜에너지는 항상 일정하다.

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

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

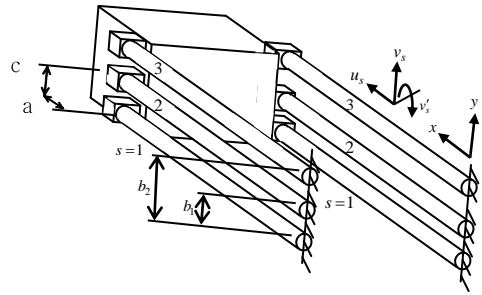


Figure 1 Optical pickup actuator with six suspensions.

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

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

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

$$T_4 = (1/2) \left[ m \left\{ \dot{u}_1(l, t) - c\dot{v}_1'(l, t) \right\}^2 + m \left\{ \dot{v}_1(l, t) + a\dot{v}_1'(l, t) \right\}^2 + J\dot{v}_1''^2(l, t) \right], \quad (4)$$

여기에서  $J$  는  $xy$  평면에 수직인 방향이며, 끝단강체의 질량중심을 통과하는 축에 대한 끝단강체의 질량관성모멘트이다.

$$J = mk^2, \quad (5)$$

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

$$T_4 = \frac{1}{2} m \dot{u}_1^2 + \frac{1}{2} m \dot{v}_1^2 + \frac{1}{2} m (a^2 + c^2 + k^2) \dot{v}_1'^2 - mc\dot{u}_1\dot{v}_1' + mav_1\dot{v}_1', \quad (6)$$

여기에서  $u_1 = u_1(l, t)$ ,  $v_1 = v_1(l, t)$  이다. 강체이기 때문에 끝단강체의 변형에 의한 포텐셜에너지는 무시한다 ( $v_4 = 0$ ).

경계조건은 다음과 같다.

$$u_s(0,t) = v_s(0,t) = v'_s(0,t) = 0, \quad s=1 \sim 3. \quad (7)$$

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

$$u_s(l,t) = u_l(l,t) - b_{s-1}v'_1(l,t), \quad s=2, 3, \quad (8)$$

$$v'_s(l,t) = v'_1(l,t), \quad s=2, 3, \quad (9)$$

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

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \sum_{s=1}^3 T_s &= \sum_{s=1}^3 \int_0^l (\rho A)_s (\dot{u}_s \ddot{u}_s + \dot{v}_s \ddot{v}_s) dx_1 \\ &+ [m\dot{u}_1 \ddot{u}_1 + m\dot{v}_1 \ddot{v}_1 + m(a^2 + c^2 + k^2)\dot{v}'_1 \ddot{v}'_1]_{x=l} \\ &- mc\dot{u}_1 \ddot{v}'_1 - mc\dot{u}'_1 \ddot{v}_1 + m\dot{a}v_1 \dot{v}'_1 + m\dot{a}v'_1 \dot{v}_1]_{x=l} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \sum_{s=1}^3 V_s &= \sum_{s=1}^3 \int_0^l \left\{ -(EA)_s u''_s \dot{u}_s + (EI)_s v^{(4)}_s \dot{v}_s \right\} dx_1 \\ &+ \left[ \sum_{s=1}^3 (EA)_s u'_s \dot{u}_1 - \sum_{s=2}^3 (EA)_s b_{s-1} u'_s \dot{v}'_1 \right. \\ &\left. + \sum_{s=1}^3 (EI)_s v''_s \dot{v}'_1 - \sum_{s=1}^3 (EI)_s v'''_s \dot{v}_1 \right]_{x=l} \end{aligned} \quad (12)$$

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

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

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

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

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

$$\begin{aligned} [m(a^2 + c^2 + k^2)\dot{v}'_1 - mc\dot{u}_1 + m\dot{a}v_1 \\ - \sum_{s=2}^3 (EA)_s b_{s-1} u'_s + \sum_{s=1}^3 (EI)_s v'''_s]_{x=l} = 0 \end{aligned} \quad (17)$$

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 있다.

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

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

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

$$u_1(l) - u_s(l) - b_{s-1}v'_1(l) = 0, \quad s=2, 3, \quad (23)$$

$$v'_s(l) = v'_1(l), \quad s=2, 3, \quad (24)$$

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

$$m\omega^2 u_1(l) - mc\omega^2 v'_1(l) - \sum_{s=1}^3 (EA)_s u'_s(l) = 0, \quad (26)$$

$$m\omega^2 v_1(l) + m\omega^2 v'_1(l) + \sum_{s=1}^3 (EI)_s v'''_s(l) = 0, \quad (27)$$

$$m(a^2 + c^2 + k^2)\omega^2 v'_1(l) - mc\omega^2 u_1(l) + m\omega^2 v_1(l) \\ + \sum_{s=2}^3 (EA)_s b_{s-1} u'_s(l) - \sum_{s=1}^3 (EI)_s v''_s(l) = 0, \quad (28)$$

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.

경계조건 (22)를 만족하는 해는 다음과 같다.

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

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

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.

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

이 때 행렬  $[a_{ij}]$ 의 성분은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} a_{11} &= \sin \beta_1 l, a_{12} = -\sin \beta_2 l, a_{13} = 0, \\ a_{14} &= b_1 \lambda_1 (S + SH)_1, a_{15} = -b_1 \lambda_1 (C - CH)_1, \\ a_{21} &= \sin \beta_1 l, a_{22} = 0, a_{23} = -\sin \beta_3 l, \\ a_{24} &= b_2 \lambda_1 (S + SH)_1, a_{25} = -b_2 \lambda_1 (C - CH)_1, \\ a_{31} &= m\omega^2 \sin \beta_1 l - (EA)_1 \beta_1 \cos \beta_1 l, \\ a_{32} &= -(EA)_2 \beta_2 \cos \beta_2 l, a_{33} = -(EA)_3 \beta_3 \cos \beta_3 l, \\ a_{34} &= mc\omega^2 \lambda_1 (S + SH)_1, a_{35} = -mc\omega^2 \lambda_1 (C - CH)_1, \\ a_{41} &= 0, a_{42} = 0, a_{43} = 0, \\ a_{44} &= m\omega^2 (C - CH)_1 - m\omega^2 \lambda_1 (S + SH)_1 \\ &+ \sum_{i=1}^3 (EI)_i \lambda_i^3 \{ \Xi_i (S - SH)_1 - \Gamma_i (C + CH)_1 \}, \\ a_{45} &= m\omega^2 (S - SH)_1 + m\omega^2 \lambda_1 (C - CH)_1 \\ &+ \sum_{i=1}^3 (EI)_i \lambda_i^3 [ \Psi_i (S - SH)_1 - \Pi_i (C + CH)_1 ], \\ a_{51} &= mc\omega^2 \sin \beta_1 l, a_{52} = -(EA)_2 b_1 \beta_2 \cos \beta_2 l, \\ a_{53} &= -(EA)_3 b_2 \beta_3 \cos \beta_3 l, \\ a_{54} &= m(a^2 + c^2 + k^2) \omega^2 \lambda_1 (S + SH)_1 \\ &- m\omega^2 (C - CH)_1, \\ &- \sum_{i=1}^3 (EI)_i \lambda_i^3 [ \Xi_i (C + CH)_1 + \Gamma_i (S + SH)_1 ], \\ a_{55} &= -m(a^2 + c^2 + k^2) \omega^2 \lambda_1 (C - CH)_1 \\ &- m\omega^2 (S - SH)_1 \\ &- \sum_{i=1}^3 (EI)_i \lambda_i^3 [ \Psi_i (C + CH)_1 + \Pi_i (S + SH)_1 ], \end{aligned} \quad (34)$$

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)를 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 3 개의 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.

$$\begin{aligned} 3(EA)_1 \beta_1 \cos \beta_1 l - m\omega^2 \sin \beta_1 l &= 0, \\ (k^2 m^2 \omega^4 \sin \beta_1 l - 2\beta_1 mc^2 \omega^2 (EA)_1 \cos \beta_1 l) (1 - \cos \lambda_1 l \cosh \lambda_1 l) &- \\ -3(EI)_1 \lambda_1^3 \{ m\omega^2 (a^2 + k^2) \sin \beta_1 l - 2\beta_1 c^2 (EA)_1 \cos \beta_1 l \} &- \\ (\sin \lambda_1 l \cosh \lambda_1 l + \cos \lambda_1 l \sinh \lambda_1 l) &- \\ -3m\omega^2 (EI)_1 \lambda_1 \sin \beta_1 l (\sin \lambda_1 l \cosh \lambda_1 l - \cos \lambda_1 l \sinh \lambda_1 l) &- \\ +9(EI)_1^2 \lambda_1^4 \sin \beta_1 l (1 + \cos \lambda_1 l \cosh \lambda_1 l) &- \\ -6am\omega^2 (EI)_1 \lambda_1^2 \sin \beta_1 l \sin \lambda_1 l \sinh \lambda_1 l &= 0 \end{aligned} \quad (37)$$

여기에서  $c = b_2 / 2 = b_1$ 의 조건을 포함한다. 식 (37)은 보의 길이방향으로의 진동모드를 가리키는, 즉 순수축진동(pure axial vibration)을 위한 특성방정식이 되며, 이는 ch. 6에서 확인할 수 있다.

### 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 상태 하에서 계산된 FEM 결과와 비교해 본다. 다음은 사용된 물성값이다.

$$\begin{aligned} \text{빔: } l &= 25\text{mm}, \quad d_s = 0.2\text{mm}, \quad \rho_s = 8250\text{kg/m}^3, \\ E_s &= 15\text{GPa}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{빔 configuration: } a &= 0.5\text{mm}, \quad c = 1.25\text{mm}, \\ b_1 &= c, \quad b_2 = 2c, \end{aligned}$$

$$\text{끝단강체: } m = 0.434 \times 10^{-3} \text{kg},$$

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

빔이 가동부의 좌우에 배치되므로, 실질적으로는 빔 단면적과 단면관성모멘트는 두 배로 계산해 주어야 한다.

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

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 보여주는 그림이다. 그림에서 알

수 있듯이 모드는 빔의 인장-압축 및 굽힘에 의한 가동부의 xy 평면 운동과 동일 평면에 직각인 축을 중심으로 하는 가동부의 회전운동으로 묘사할 수 있다.

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

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

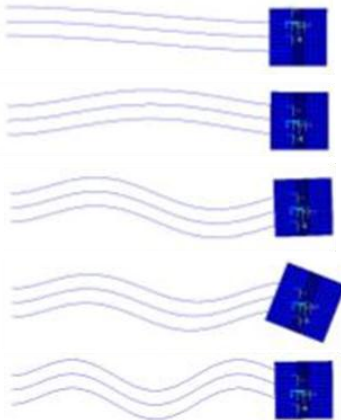
동일한 방법으로, 특성행렬의 판별식 (36)도 그 정확성을 확인해 볼 수 있다. 위에서 제시한 각종 물성값에서 빔을 다르게 하기 위해 아래와 같이 일부는 다른 물성값을 적용해 본다.

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

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

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

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



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

상기 결과를 요약하면, 식 (38)은 동일 물성이며, 가동부에 대해 대칭적으로 배치된 3 개의 빔을 갖는 구조물을 위한 축-굽힘연성진동(coupled axial-bending vibration)의 특성방정식임을 알 수 있다. 판별식 (36)도 역시 축-굽힘연성진동을 위한 특성 방정식이 됨을 알 수 있다. 그리고 Fig. 2 를 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 것임을 알 수 있다.

#### 4. 결과의 응용

위에서 구한 판별식 (36)을 이용하여, 상중하 서로 다른 물성을 갖는 6 개의 서스펜션에 대물렌즈 가동부가 부착된 액추에이터 구조물의 진동모드를 분석하고자 한다.

6 개 서스펜션은 3 개의 빔으로 간주되어야 하므로, 우선 빔의 단면적과 단면 2 차 모멘트를 식 (39)와 같이 한다. 그리고 진동모드에 의한 대물렌즈의 포커싱방향 자세(가동부의 병진, 회전 운동)를 분석하기 위해 몇 가지 설계변수를 변경하면서, 1 번 빔의 모드방정식, 즉 진동모드를 구해본다. 진동모드는 정규화(normalization) 과정을 거쳐서 비교된다. 이때 판별식 (36)을 푸는 과정에서 모드주파수(mode frequency)를 얻게 되면 식 (30)에 넣어서 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

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

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

식 (41)이 정규화된 모드방정식이다.

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

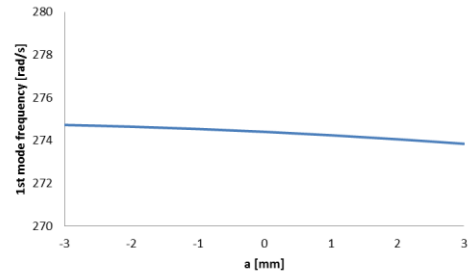
빔:  $d_1 = 0.11\text{mm}$ ,  $d_2 = 0.09\text{mm}$ ,  $d_3 = 0.07\text{mm}$ ,  $l = 11\text{mm}$ ,

$\rho_1 = \rho_2 = \rho_3 = 8250\text{kg/m}^3$ ,  $E_1 = E_2 = E_3 = 127\text{GPa}$ ,

끝단강체:  $m = 0.35 \times 10^{-3}\text{kg}$ ,  $k = 2 \times 10^{-3}\text{m}^2$ ,

빔간격:  $b_1 = 1\text{mm}$ ,  $b_2 = 2\text{mm}$ ,

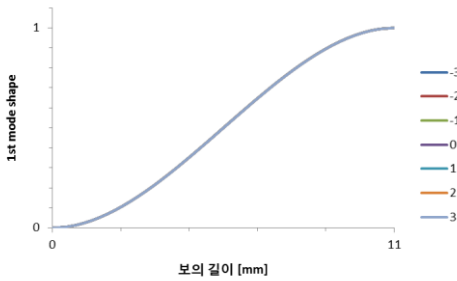
설계변수:  $a = -3 \sim 3\text{mm}$ ,  $c = 0 \sim 5\text{mm}$ .



(a) 1<sup>st</sup> mode frequency.

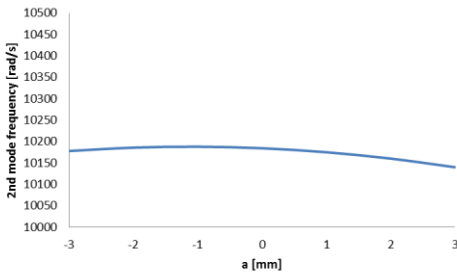
먼저  $c = 2.5\text{mm}$  로 고정한 상태에서  $a = -3 \sim 3\text{mm}$  의 범위 내에서 변경하면서, 판별식

(36)을 이용하여 모드주파수와 모드형상을 관찰해 본다.

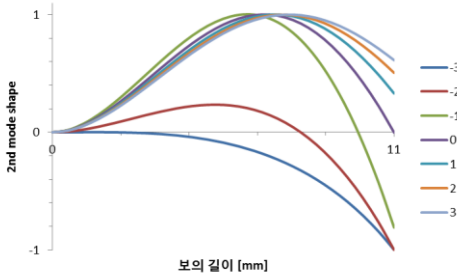


(b) 1<sup>st</sup> mode shape.

Figure 3 1<sup>st</sup> mode frequency and mode shape with respect to  $a$  (at  $c = 2.5$ ).



(a) 2<sup>nd</sup> mode frequency.



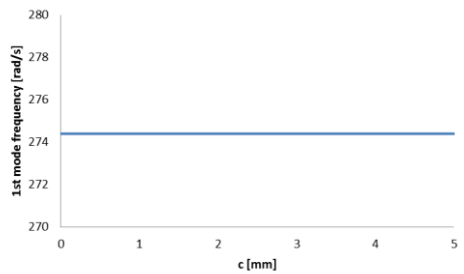
(b) 2<sup>nd</sup> mode shape.

Figure 4 2<sup>nd</sup> mode frequency and mode shape with respect to  $a$  (at  $c = 2.5$ ).

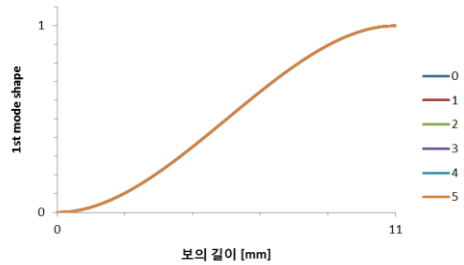
첫 번째, 두 번째 모드주파수(포커싱, 피칭모드 주파수)는 설계변수  $a$  의 변화에 둔감함을 보여준다 [Fig. 3 (a), Fig. 4 (a)]. 모드형상의 경우, 첫 번째 모드(포커싱모드)는 변화를 보이지 않는다 [Fig. 3 (b)]. 그러나 두 번째 모드(피칭모드)는 큰 변화를 보여준다 [Fig. 4 (b)]. 즉 두 번째

모드형상은 설계변수  $a$  에 의해 독립적으로 조절이 가능함을 알 수 있다.

다음으로는  $a = 0$  으로 고정한 상태에서  $c = 0 \sim 5\text{mm}$  의 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.

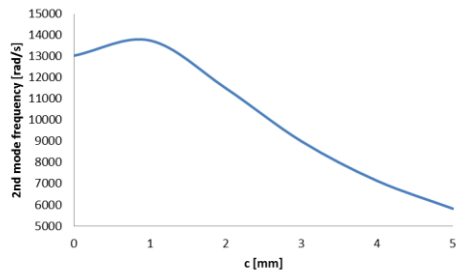


(a) 1<sup>st</sup> mode frequency.



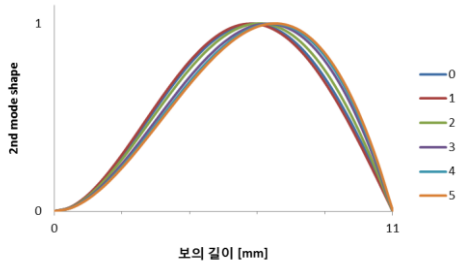
(b) 1<sup>st</sup> mode shape.

Figure 5 1<sup>st</sup> mode frequency and mode shape with respect to  $c$  (at  $a = 0$ ).



(a) 2<sup>nd</sup> mode frequency.

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.



(b) 2<sup>nd</sup> mode shape.

Figure 6 2<sup>nd</sup> mode frequency and mode shape with respect to  $c$  (at  $a = 0$ )

## 5. 결론

본 논문은 6 와이어 서스펜션을 갖는 광픽업 액추에이터를 수학적으로 모델링하여 진동모드와 관련된 특성방정식과 판별식을 제시하고 있다. 이 결과를 이용하여 공진주파수 및 공진모드를 추출하였고, 이것들을 설계변수와 연관지어 그 변화추이를 시각적으로 보여주고 있다. 이를 통해 픽업 액추에이터의 공진주파수 및 공진모드의 변경이 가능하다는 것을 제시하였다.

## 6. 참고

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.

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

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

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

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

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

빔의 물성이 모두 같기 때문에  $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3$  이 된

다는 것을 이용하면서, (A-2), (A-3) 조건을 (A-4) 식에 대입하면 식 (37)이 구해진다. 따라서 식 (37)은 순수축진동(pure axial vibration)에 관한 특성방정식이라는 사실을 알 수 있다.

## 사 사

이 논문은 한국교원대학교 2011학년도 KNUE 학술연구비 지원을 받아 수행하였음.

## 참 고 문 헌

- (1) Nagasato, M., 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., 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., 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., 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., 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., Yang, Y. T., 2005, Development of 3-Axis Slim Actuator Using Moving Magnet and PCB, Transactions of the KSNVE, Vol. 15, No. 2, pp. 156~160.
- (7) Go, S. S., Ryu, J. H., Park, K. H., Jeong, H. S., 1998, Actuating Characteristics of an Asymmetric Optical Pick-up Fine Actuator of a High Speed CD-ROM, Transactions of the KSNVE, Vol. 8, No. 2, pp. 346~352.
- (8) Mathematica 6.5, Wolfram Research Inc., 2007.