

운동방정식에 의한 픽업 액추에이터 모드 분석

A Mathematical Approach for Analysis of Modes in Pickup Actuators

이경택†

Kyung Taek Lee

Key Words : Wire suspension(와이어 서스펜션), Rigid body(끝단강체), Coupled bending-torsional vibration(굽힘-비틀림 연성진동), Actuator(액추에이터), Rolling mode(롤링모드).

ABSTRACT

In this paper, the vibration for a pickup actuator is described by mathematically analyzing its suspension configuration and motion, confined to lateral and torsional directions of suspensions. In order to prove the accuracy of this result, it is compared to a finite element analysis. Also it is shown that modal frequencies can be modified by changing design parameters in mathematical motion expressions.

기 호 설 명

s : 서스펜션 번호

l : 서스펜션 길이

$(\rho A)_s$: s 번째 서스펜션의 밀도와 단면적의 곱

$(EI)_s$: s 번째 서스펜션의 탄성계수와 단면 2 차 모멘트의 곱

$(GI_p)_s$: s 번째 서스펜션의 전단탄성계수와 단면의 극관성모멘트의 곱

b_1, b_2, b_3 : 각각 첫번째 서스펜션과 3 번째(4 번째), 5 번째(6 번째), 7 번째 서스펜션 사이의 y 방향 거리

m : 끝단강체의 질량

c, r : 첫 번째 서스펜션의 끝단과 끝단강체 질량중심 사이의 y 축, z 축 방향 거리

h : 끝단강체의 질량 중심을 통과하고, 서스펜션에 나란한 축에 대한 끝단 강체의 회전 반지름 (radius of gyration)

$\phi_s(x, t)$: s 번째 서스펜션의 비틀림운동에 의한 비틀림각

$v_s(x, t), w_s(x, t)$: s 번째 서스펜션의 y, z 방향 굽힘 변형 (deflection)

ω : 라디안 고유진동수 [rad/s]

1. 서 론

광디스크 드라이브에서 광픽업(optical pickup)은 대물렌즈를 구동하여 디스크 위에 있는 신호 트랙에 광스팟(optical spot)을 정확하게 맺히도록 하기 위해 광픽업 액추에이터(optical pickup actuator)를 사용하고 있다. 이 액추에이터는 포커싱(focusing) 및 트래킹(tracking) 동작을 허용하고 있으며, 디스크 스큐(skew)에 대응하기 위해 틸트 동작까지 가능하도록 설계하고 있다. 이러한 동작을 위해 광픽업 액추에이터는 대물렌즈를 포함하고 있는 가동부(moving part)와 이를 지지하기 위한 서스펜션을 구

† Corresponding author; Korea National University of Education

E-mail : ktleee@knu.ac.kr

Tel : (043) 230-3772, Fax : (043) 230-3775

비하고 있으며, 구동을 위해 가동부에 코일이 부착되고 고정부에는 자석이 설치되어 있다^(1, 2). 서스펜션의 지지 목적 외의 또 다른 역할은 가동부에 부착된 코일에의 급전(electrical power supply)이다. 이러한 목적을 위해 3 축 구동 액추에이터는 보통 6 개의 서스펜션을 사용하게 된다.

액추에이터에서 가동부에 부착된 코일에 전류를 흐르게 하면 고정부에 부착된 자석과의 상호작용에 의해 힘이 발생하여 가동부는 힘을 받게 되고, 서스펜션의 변형을 통해 앞에서 언급한 포커싱, 트래킹, 틸트동작이 이루어지게 된다. 이 방향 이외 다른 방향으로의 동작은 최대한 억제하여야 하므로 설계자들은 구조해석 프로그램을 사용하여, 액추에이터를 구성하는 재료의 물성과 치수와 관련된 설계변수를 변경해 가면서 각종 진동모드를 분석하고 불필요한 모드를 억제하고 있다. 그러나 구조해석 프로그램의 결과는 사용자의 경험에 의지한 각종 설계값에 따라 결과가 달라질 수 있으며, 더욱이 구조해석 프로그램에서는 설계변경을 위한 설계변수의 변경방향을 판단하기가 어려워서 해석에 소요되는 시간도 상당하다고 할 수 있다.

본 연구는 이러한 문제점을 보완하고자, 설계변수에 따른 진동모드 및 주파수를 수학적으로 표현하려는 노력의 일환으로, 저자의 앞선 논문⁽³⁾에서는 포커싱, 트래킹 모션과 동일 방향의 고차 모드에 관한 정보를 수학적으로 구하는 과정을 보여주었으며, 그것에 이어서 디스크 반경 방향의 롤링모드와 관련된 정보를 수학적 전개를 통해 구하는 것을 이 논문의 주요한 논제로 한다.

이를 위해 6 개의 와이어 서스펜션이 끝단강체에 의해 연결되어 있는 액추에이터 구조물의 진동해석을 위해, 와이어 서스펜션의 굽힘-비틀림 연성진동(coupled bending-torsional vibration)을 위한 특성행렬을 유도하고 모드주파수를 얻었으며, 정확성을 검증하기 위해 동일 조건 하에서 수행된 FEM 해석결과와 비교하였다.

2. 수학적 전개

Fig. 1 과 같이 3 축 광픽업 액추에이터는 6 개의 서스펜션을 가지고 있다. 이 와이어 서스펜션은 y, z 축을 따라 굽힘변형(bending deformation)과 비틀림변형(torsional deformation)을 할 수 있다고 가정한다.

이 모델에서는 서스펜션의 단면적이 매우 작은 경

우로 국한하여, 서스펜션의 진단변형에 의한 굽힘은 무시하기로 한다.

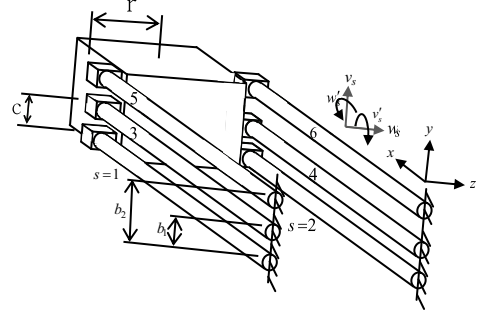


Figure 1 Optical pickup actuator with six suspensions.

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

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\sum_{s=1}^7 T_s + \sum_{s=1}^7 V_s \right) = 0, \quad (1)$$

여기에서 $s=1\sim 6$ 은 실제로 장착된 와이어 서스펜션을 지칭하고, $s=7$ 은 끝단강체를 의미한다. 모든 서스펜션의 운동 및 포텐셜에너지를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\sum_{s=1}^6 T_s = \sum_{s=1}^6 \int_0^l \left[\frac{1}{2} (\rho I_p)_s \dot{\phi}_s^2(x, t) + \frac{1}{2} (\rho A)_s \{ \dot{v}_s^2(x, t) + \dot{w}_s^2(x, t) \} \right] dx, \quad (2)$$

$$\sum_{s=1}^6 V_s = \sum_{s=1}^6 \int_0^l \left[\frac{1}{2} (G I_p)_s \phi_s'^2(x, t) + \frac{1}{2} (E I)_s \{ v_s''^2(x, t) + w_s''^2(x, t) \} \right] dx. \quad (3)$$

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

$$T_7 = (1/2) [m \{ \dot{v}_1(l, t) - r \dot{\phi}_1(l, t) \}^2 + m \{ \dot{w}_1(l, t) + c \dot{\phi}_1(l, t) \}^2 + J \dot{\phi}_1^2(l, t)] \quad (4)$$

여기에서 J 는 끝단강체의 질량관성모멘트로서 x 축에 나란하며, 끝단강체의 질량중심을 통과하는 축에 대한 것으로서 다음과 같이 간략하게 표현할 수 있다.

$$J = m h^2, \quad (5)$$

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

$$T_7 = \frac{1}{2}m\dot{v}_1^2 + \frac{1}{2}m\dot{w}_1^2 + \frac{1}{2}m(c^2 + h^2 + r^2)\dot{\phi}_1^2 - mr\dot{v}_1\dot{\phi}_1 + mc\dot{w}_1\dot{\phi}_1, \quad (6)$$

여기에서 $v_1 = v_1(l, t)$, $w_1 = w_1(l, t)$, $\phi_1 = \phi_1(l, t)$ 이다. 강체로 가정했기 때문에 끝단강체의 변형에 의한 포텐셜에너지는 무시한다 ($V_7 = 0$).

경계조건은 다음과 같다.

$$\phi_s(0, t) = v_s(0, t) = v'_s(0, t) = w_s(0, t) = w'_s(0, t) = 0, \quad s = 1 \sim 6. \quad (7)$$

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

$$\phi_s(l, t) = \phi_1(l, t), \quad s = 1 \sim 6, \quad (8)$$

$$v'_s(l, t) = 0, \quad s = 1 \sim 6, \quad (9)$$

$$v_2(l, t) = v_1(l, t) - 2r\phi_1(l, t), \quad v_3(l, t) = v_1(l, t),$$

$$v_4(l, t) = v_2(l, t), \quad v_5(l, t) = v_1(l, t), \quad v_6(l, t) = v_2(l, t), \quad (10)$$

$$w'_s(l, t) = 0, \quad s = 1 \sim 6, \quad (11)$$

$$w_2(l, t) = w_1(l, t), \quad w_3(l, t) = w_1(l, t) + b_1\phi_1(l, t),$$

$$w_4(l, t) = w_3(l, t), \quad w_5(l, t) = w_1(l, t) + b_2\phi_1(l, t),$$

$$w_6(l, t) = w_5(l, t). \quad (12)$$

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \sum_{s=1}^7 T_s &= \sum_{s=1}^6 \int_0^l \left[(\rho I_p)_s \dot{\phi}_s \ddot{\phi}_s + (\rho A)_s (\dot{v}_s \ddot{v}_s + \dot{w}_s \ddot{w}_s) \right] dx_1 \\ &+ [m\dot{v}_1 \ddot{v}_1 + m\dot{w}_1 \ddot{w}_1 + m(c^2 + h^2 + r^2)\dot{\phi}_1 \ddot{\phi}_1 - mr\dot{v}_1 \ddot{\phi}_1 - mr\dot{v}_1 \ddot{\phi}_1 + mc\dot{w}_1 \ddot{\phi}_1 + mc\dot{w}_1 \ddot{\phi}_1]_{x=l}, \quad (13) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \sum_{s=1}^6 V_s &= \sum_{s=1}^6 \int_0^l \left\{ -(GI_p)_s \phi_s'' \dot{\phi}_s + (EI)_s v_s^{(4)} \dot{v}_s + (EI)_s w_s^{(4)} \dot{w}_s \right\} dx_1 \\ &+ \left[\sum_{s=1}^6 (GI_p)_s \phi_s' \dot{\phi}_1 - \sum_{s=1}^6 (EI)_s v_s'' \dot{v}_1 + 2r(EI)_2 v_2'' \dot{\phi}_1 \right. \\ &+ 2r(EI)_4 v_4'' \dot{\phi}_1 + 2r(EI)_6 v_6'' \dot{\phi}_1 - \sum_{s=1}^6 (EI)_s w_s'' \dot{w}_1 \\ &\left. - b_1(EI)_3 w_3'' \dot{\phi}_1 - b_1(EI)_4 w_4'' \dot{\phi}_1 - b_2(EI)_5 w_5'' \dot{\phi}_1 - b_2(EI)_6 w_6'' \dot{\phi}_1 \right]_{x=l} \quad (14) \end{aligned}$$

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

식 (13), (14)를 식 (1)에 넣으면 운동방정식(15)-(17) 및 $x = l$ 에서의 연속조건식 (continuity condition equation) (18)-(20)을 얻게 된다.

$$(\rho I_p)_s \ddot{\phi}_s(x, t) - (GI_p)_s \phi_s''(x, t) = 0, \quad 0 \leq x \leq l, \quad 0 \leq t, \quad s = 1 \sim 6, \quad (15)$$

$$(\rho A)_s \ddot{v}_s(x, t) + (EI)_s v_s^{(4)}(x, t) = 0, \quad 0 \leq x \leq l, \quad 0 \leq t, \quad s = 1 \sim 6, \quad (16)$$

$$(\rho A)_s \ddot{w}_s(x, t) + (EI)_s w_s^{(4)}(x, t) = 0, \quad 0 \leq x \leq l, \quad 0 \leq t, \quad s = 1 \sim 6, \quad (17)$$

$$\left[\begin{aligned} &m(c^2 + h^2 + r^2)\ddot{\phi}_1 - mr\ddot{v}_1 + mc\ddot{w}_1 + 2r(EI)_2 v_2'' \\ &+ 2r(EI)_4 v_4'' + 2r(EI)_6 v_6'' \\ &- b_1(EI)_3 w_3'' - b_1(EI)_4 w_4'' - b_2(EI)_5 w_5'' \\ &- b_2(EI)_6 w_6'' + \sum_{s=1}^6 (GI_p)_s \phi_s' \end{aligned} \right]_{x=l} = 0, \quad (18)$$

$$\left[m\ddot{v}_1 - mr\ddot{\phi}_1 - \sum_{s=1}^6 (EI)_s v_s'' \right]_{x=l} = 0, \quad (19)$$

$$\left[m\ddot{w}_1 + mc\ddot{\phi}_1 - \sum_{s=1}^6 (EI)_s w_s'' \right]_{x=l} = 0, \quad (20)$$

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

운동방정식 (15)-(17)의 해는 다음과 같이 가정할 수 있다.

$$\phi_s(x, t) = \phi_s(x) \cos \omega t, \quad s = 1 \sim 6, \quad (21)$$

$$v_s(x, t) = v_s(x) \cos \omega t, \quad s = 1 \sim 6, \quad (22)$$

$$w_s(x, t) = w_s(x) \cos \omega t, \quad s = 1 \sim 6. \quad (23)$$

위 식을 이용하면 식 (7)-(12), (15)-(20)에 포함되어 있는 시간 항을 제거할 수 있어서 다음과 같이 정리된다.

$$\phi_s''(x) + \beta_s^2 \phi_s(x) = 0, \quad 0 \leq x \leq l, \quad s = 1 \sim 6, \quad (24)$$

$$v_s^{(4)}(x) - \lambda_s^4 v_s(x) = 0, \quad 0 \leq x \leq l, \quad s = 1 \sim 6, \quad (25)$$

$$w_s^{(4)}(x) - \lambda_s^4 w_s(x) = 0, \quad 0 \leq x \leq l, \quad s = 1 \sim 6, \quad (26)$$

$$\phi_s(0) = v_s(0) = v'_s(0) = w_s(0) = w'_s(0) = 0, \quad s = 1 \sim 6, \quad (27)$$

$$\phi_s(l) = \phi_1(l), \quad s = 1 \sim 6, \quad (28)$$

$$v'_s(l) = 0, \quad s = 1 \sim 6, \quad (29)$$

$$v_2(l) = v_1(l) - 2r\phi_1(l), \quad v_3(l) = v_1(l), \quad v_4(l) = v_2(l),$$

$$v_5(l) = v_1(l), \quad v_6(l) = v_2(l), \quad (30)$$

$$w'_s(l) = 0, \quad s = 1 \sim 6, \quad (31)$$

$$w_2(l) = w_1(l), \quad w_3(l) = w_1(l) + b_1\phi_1(l), \quad w_4(l) = w_3(l),$$

$$w_5(l) = w_1(l) + b_2\phi_1(l), \quad w_6(l) = w_5(l), \quad (32)$$

$$\begin{aligned}
& m(c^2 + h^2 + r^2)\omega^2 \phi_1(l) - mr\omega^2 v_1(l) + mc\omega^2 w_1(l) \\
& - 2r(EI)_2 v_2'''(l) - 2r(EI)_4 v_4'''(l) - 2r(EI)_6 v_6'''(l) \\
& + b_1(EI)_3 w_3'''(l) + b_1(EI)_4 w_4'''(l) + b_2(EI)_5 w_5'''(l), \quad (33) \\
& + b_2(EI)_6 w_6'''(l) - \sum_{s=1}^6 (GI_p)_s \phi_s'(l) = 0
\end{aligned}$$

$$m\omega^2 v_1(l) - mr\omega^2 \phi_1(l) + \sum_{s=1}^6 (EI)_s v_s'''(l) = 0, \quad (34)$$

$$m\omega^2 w_1(l) + mc\omega^2 \phi_1(l) + \sum_{s=1}^6 (EI)_s w_s'''(l) = 0, \quad (35)$$

여기에서 $\beta_s^2 = \omega^2 (\rho/G)_s$, $\lambda_s^4 = \omega^2 (\rho A/EI)_s$ 이다.

식 (24)-(26)을 위한 해는 경계조건 (27)을 만족해야 하므로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\phi_s(x) = B_s \sin \beta_s x, \quad s = 1 \sim 6, \quad (36)$$

$$\begin{aligned}
v_s(x) &= C_s (\cos \lambda_s x - \cosh \lambda_s x) \\
&+ D_s (\sin \lambda_s x - \sinh \lambda_s x), \quad s = 1 \sim 6,
\end{aligned} \quad (37)$$

$$\begin{aligned}
w_s(x) &= F_s (\cos \lambda_s x - \cosh \lambda_s x) \\
&+ H_s (\sin \lambda_s x - \sinh \lambda_s x), \quad s = 1 \sim 6,
\end{aligned} \quad (38)$$

여기에서 B_s, C_s, D_s, F_s 와 H_s 는 모드 계수(modal coefficients)이다. 한편, 연결조건 (28), (29), (31)로부터 다음과 같은 관계를 얻을 수 있다.

$$B_s = \frac{\sin \beta_s l}{\sin \beta_s l} B_1, \quad s = 2 \sim 6, \quad (39)$$

$$D_s = \Lambda_s C_s, \quad s = 1 \sim 6, \quad (40)$$

$$H_s = \Lambda_s F_s, \quad s = 1 \sim 6. \quad (41)$$

위 식의 계수는 다음과 같다. $\Lambda_s = \frac{\sin \lambda_s l + \sinh \lambda_s l}{\cos \lambda_s l - \cosh \lambda_s l}$.

연결조건식 (30)과 (32)는 다음과 같은 관계를 준다.

$$\begin{aligned}
C_2 &= -2r\Gamma_{1/2} B_1 + \Delta_{1/2} C_1, \quad C_3 = \Delta_{1/3} C_1, \\
C_4 &= -2r\Gamma_{1/4} B_1 + \Delta_{1/4} C_1, \quad C_5 = \Delta_{1/5} C_1, \\
C_6 &= -2r\Gamma_{1/6} B_1 + \Delta_{1/6} C_1.
\end{aligned} \quad (42)$$

$$\begin{aligned}
F_2 &= \Delta_{1/2} F_1, \quad F_3 = b_1 \Gamma_{1/3} B_1 + \Delta_{1/3} F_1, \\
F_4 &= b_1 \Gamma_{1/4} B_1 + \Delta_{1/4} F_1, \quad F_5 = b_2 \Gamma_{1/5} B_1 + \Delta_{1/5} F_1, \\
F_6 &= b_2 \Gamma_{1/6} B_1 + \Delta_{1/6} F_1.
\end{aligned} \quad (43)$$

위 식의 계수는 다음과 같다.

$$\Gamma_{1/s} = \frac{\sin \beta_1 l}{(\cos \lambda_s l - \cosh \lambda_s l) + \Lambda_s (\sin \lambda_s l - \sinh \lambda_s l)},$$

$$\Delta_{1/s} = \frac{(\cos \lambda_1 l - \cosh \lambda_1 l) + \Lambda_1 (\sin \lambda_1 l - \sinh \lambda_1 l)}{(\cos \lambda_s l - \cosh \lambda_s l) + \Lambda_s (\sin \lambda_s l - \sinh \lambda_s l)}.$$

해 (36)-(38)을 연속조건식 (33)-(35)에 대입하고, (39)-(43)의 관계를 고려하면 다음과 행렬식을 얻을 수 있다.

$$[a_{ij}] \{g_j\} = \{0\}, \quad i, j = 1 \sim 3. \quad (44)$$

이때 행렬 $[a_{ij}]$ 의 성분은

$$\begin{aligned}
a_{11} &= m(c^2 + h^2 + r^2)\omega^2 \sin \beta_1 l \\
&- \sin \beta_1 l \sum_{s=1}^6 (GI_p)_s \beta_s \cot \beta_s l \\
&+ 4r^2 \Gamma_{1/2} (EI)_2 \lambda_2^3 \{(S - SH)_2 - \Lambda_2 (C + CH)_2\} \\
&+ 4r^2 \Gamma_{1/4} (EI)_4 \lambda_4^3 \{(S - SH)_4 - \Lambda_4 (C + CH)_4\} \\
&+ 4r^2 \Gamma_{1/6} (EI)_6 \lambda_6^3 \{(S - SH)_6 - \Lambda_6 (C + CH)_6\} \\
&+ b_1^2 \sum_{s=3}^4 \Gamma_{1/s} (EI)_s \lambda_s^3 \{(S - SH)_s - \Lambda_s (C + CH)_s\} \\
&+ b_2^2 \sum_{s=5}^6 \Gamma_{1/s} (EI)_s \lambda_s^3 \{(S - SH)_s - \Lambda_s (C + CH)_s\} \\
a_{12} &= mr\omega^2 \{(C - CH)_1 + \Lambda_1 (S - SH)_1\} \\
&+ 2r\Delta_{1/2} (EI)_2 \lambda_2^3 \{(S - SH)_2 - \Lambda_2 (C + CH)_2\} \\
&+ 2r\Delta_{1/4} (EI)_4 \lambda_4^3 \{(S - SH)_4 - \Lambda_4 (C + CH)_4\} \\
&+ 2r\Delta_{1/6} (EI)_6 \lambda_6^3 \{(S - SH)_6 - \Lambda_6 (C + CH)_6\},
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
a_{13} &= mc\omega^2 \{(C - CH)_1 + \Lambda_1 (S - SH)_1\} \\
&+ b_1 \sum_{s=3}^4 \Delta_{1/s} (EI)_s \lambda_s^3 \{(S - SH)_s - \Lambda_s (C + CH)_s\}, \\
&+ b_2 \sum_{s=5}^6 \Delta_{1/s} (EI)_s \lambda_s^3 \{(S - SH)_s - \Lambda_s (C + CH)_s\}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
a_{21} &= mr\omega^2 \sin \beta_1 l \\
&+ 2r\Gamma_{1/2} (EI)_2 \lambda_2^3 \{(S - SH)_2 - \Lambda_2 (C + CH)_2\} \\
&+ 2r\Gamma_{1/4} (EI)_4 \lambda_4^3 \{(S - SH)_4 - \Lambda_4 (C + CH)_4\} \\
&+ 2r\Gamma_{1/6} (EI)_6 \lambda_6^3 \{(S - SH)_6 - \Lambda_6 (C + CH)_6\}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
a_{22} &= m\omega^2 \{(C - CH)_1 + \Lambda_1 (S - SH)_1\} \\
&+ \sum_{s=1}^6 \Delta_{1/s} (EI)_s \lambda_s^3 \{(S - SH)_s - \Lambda_s (C + CH)_s\},
\end{aligned}$$

$$a_{23} = 0,$$

$$\begin{aligned}
a_{31} &= mc\omega^2 \sin \beta_1 l \\
&+ b_1 \sum_{s=3}^4 \Gamma_{1/s} (EI)_s \lambda_s^3 \{(S - SH)_s - \Lambda_s (C + CH)_s\}, \\
&+ b_2 \sum_{s=5}^6 \Gamma_{1/s} (EI)_s \lambda_s^3 \{(S - SH)_s - \Lambda_s (C + CH)_s\}
\end{aligned}$$

$$a_{32} = 0,$$

$$a_{33} = m\omega^2 \{(C - CH)_1 + \Lambda_1(S - SH)_1\} + \sum_{s=1}^6 \Delta_{1/s} (EI)_s \lambda_s^3 \{(S - SH)_s - \Lambda_s(C + CH)_s\}'$$

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. 모드벡터는 다음과 같다.

$$\{g_j\} = \{B_1, C_1, F_1\}^T. \quad (45)$$

식 (45)의 해가 존재하기 위해서는 다음과 같은 조건이 필요하다.

$$\det[a_{ij}] = 0. \quad (46)$$

식 (46)에, 주어진 대상을 위한 실제 물성값을 대입하고 수학프로그램⁽⁴⁾을 사용하게 되면 ω (radian natural frequency)의 함수로 표현되는 특성방정식 (characteristic equation)을 얻게 된다.

3. 정확성 검증

위에서 구한 특성방정식 (46)의 물리적 의미와 그 정확성을 증명하기 위해 실제 값을 사용하여 모드 주파수를 구해보고, 특별히 가동부 및 서스펜션의 운동이 yz 평면에만 허용된 조건 하에서 계산된 FEM 결과와 비교해 본다. 다음은 이때 사용된 물성값이다.

서스펜션: $l = 20\text{mm}$, $d_s = 0.1\text{mm}$, $\rho_s = 8250\text{kg/m}^3$,
 $\nu_s = 0.36$, $E_s = 15\text{GPa}$,
 서스펜션 configuration: $c = 1.25\text{mm}$, $r = 6.5\text{mm}$,
 $b_1 = c$, $b_2 = 2c$,
 끝단강체: $m = 0.434 \times 10^{-3}\text{kg}$, $J = 6.537 \times 10^{-9}\text{kg} \cdot \text{m}^3$.

사용된 물성값은 s=1~6의 서스펜션이 모두 동일하며, 끝단강체도 서스펜션에 대칭적으로 배치된 경우의 것이다. 위에서 계산한 값들을 특성방정식 (46)에 대입하면 Table 1에서와 같은 ω (radian natural frequency)를 얻을 수 있으며, FEM 결과와 비교하면 잘 맞는다는 것을 알 수 있다. 참고로 기존 계산방법⁽⁵⁾에 의한 값도 제시하였다. Fig. 2는 FEM 해석으로부터 얻어진 모드형상이며 1 차부터 3 차까지 보여주는 그림이다.

Table 1 Comparison of Eq. (46) and FEM result.

	ω_1	ω_2	ω_3
(46)	38.95		82.12
FEM	38.69	39.03	80.63
기존 계산방법		39.08	81.14

동일한 방법으로, 서로 다른 서스펜션인 경우에도 비교해 볼 수 있다. 위에서 제시한 각종 물성값에서, 서스펜션을 다르게 하기 위해 아래와 같이 일부는 다른 물성값을 적용해 본다.

$$d_2 = 1.05d_1, \quad d_3 = d_4 = 1.1d_1, \quad d_5 = d_6 = 1.2d_1$$

$$E_3 = E_4 = 1.05E_1, \quad E_5 = E_6 = 1.1E_1.$$

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

Table 2 Comparison of Eq. (46) and FEM result.

	ω_1	ω_2	ω_3
(46)	49.27	49.32	103.91
FEM	48.69	48.91	100.56

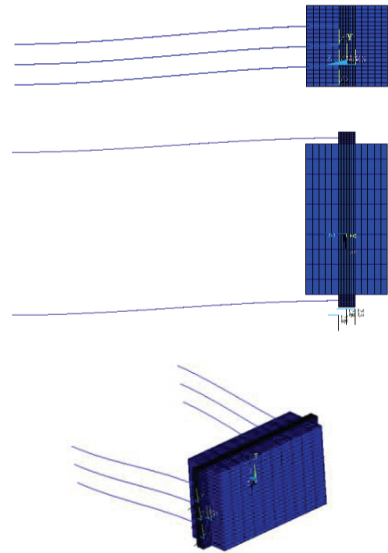


Figure 2 Mode shapes by FEM simulation.

4. 결과의 응용

액추에이터 설계자들이 관심을 가져온 문제 중 하나는 와이어 서스펜션과 가동부의 질량중심이 일치하지 않는 경우에 모드 주파수를 구하는 문제이다. 그러나 이를 계산할 수 있는 이론적 근거가 미비하

참 고 문 헌

(1) 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.

(2) 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.

(3) Lee, K. T., 2012, A Mathematical Approach for Vibration Analysis of a Pickup Actuator, Transactions of the KSNVE, Vol. 22, No. 11, pp. 1128~1136.

(4) Mathematica 6.5, Wolfram Research Inc., 2007.

(5) Jeong, H. S., Yoon, Y. H., 2001, Improvement of Magnetic Circuit Characteristics for Moving Magnet Type Actuator in High Density Optical Disc, Proceedings of the KSNVE Autumn Annual Conference, pp. 780~785.

였기 때문에, 현실적인 대안으로서 구조해석프로그램을 이용하여 계산하는 것이다. 그러나 이러한 해석은 과정의 특성 상, 시간적, 인적 요구가 과다한 것이 문제이다. 그래서 본 논문의 수학적 전개 결과를 이용하여 이런 부분을 대체할 수 있음을 보이려고 한다.

먼저 위에서 구한 특성방정식 (46)을 이용하여, 상중하 다른 물성이며 좌우 같은 물성을 갖는 6 개의 와이어 서스펜션에 대물렌즈 가동부가 부착된 액추에이터에서, 포커싱, 트래킹 모드 및 와이어 길이방향을 중심으로 회전하는 진동모드(rolling 모드)를 분석하고자 한다.

6 개의 와이어 서스펜션은 끝단강체에 연결되어 있으므로 특정 서스펜션의 끝단의 모드변위 $v_s(l)$, $w_s(l)$ 및 회전각 $\phi_s(l)$ 으로 끝단강체의 모드를 설명할 수 있다. 그러므로 예컨대 1 번 와이어 서스펜션의 회전모드를 추출하여, 설계변수에 따른 변화를 관찰하게 되면 끝단강체의 모드를 설명할 수 있게 된다.

먼저 특성방정식 (46)을 푸는 과정에서 모드주파수(mode frequency)를 얻고, 이를 식 (36)-(38)에 넣은 후에 정규화(normalization) 과정을 거치면 다음과 같이 정규화된 회전각에 관한 모드방정식을 얻게 된다.

$$\bar{\phi}_7(x) = \sin \omega \sqrt{\frac{\rho_7}{G_7}} x. \tag{47}$$

$$\bar{v}_7(x) = (\cos \lambda_7 x - \cosh \lambda_7 x) + \Lambda_7 (\sin \lambda_7 x - \sinh \lambda_7 x), \tag{48}$$

$$\bar{w}_7(x) = (\cos \lambda_7 x - \cosh \lambda_7 x) + \Lambda_7 (\sin \lambda_7 x - \sinh \lambda_7 x), \tag{49}$$

구해진 모드주파수 값을 각각 식 (47)-(49)에 대입하여 모드형상을 그릴 수 있다.

5. 결론

본 논문은 6 와이어 서스펜션을 갖는 광픽업 액추에이터를 수학적으로 모델링하여 진동모드와 관련된 특성방정식을 제시하고 있다. 이 결과를 이용하여 포커싱, 트래킹, 롤링 모드 및 모드주파수를 계산하고, 설계변수와 연관지어 그 변화추이를 표현할 수 있음을 보여주고 있다.

사 사

이 논문은 한국교원대학교 2011년도 신입교수 학