한국소음진동공학회 2000년도 추계학술대회논문집, pp. 667~673.

초기 비틀림각을 갖는 복합재료 회전보의 능동진동제어

Active Vibrational Control of Pretwisted Rotating Composite Beams

오상용* · 송오섭**

Key Words : Pretwisted angle(초기 비틀림각), Adaptive capabilities(적응력), Feedback control (피드백제어), Flapping-lagging motion(플랩과 래깅운동), tailoring(테일러링)

ABSTRACT

A number of issues related with the vibrational behavior of pretwisted rotating beams featuring anisotropic properties and incorporating adaptive capabilities are considered in this paper. The adaptive capabilities are provided by a system of piezoactuators bonded or embedded into the structure. Based on the converse piezoelectric effect and on the out of phase activation, boundary control moments are pizoelectrically induced at the beam tip. A feedback control law relating the induced bending moments with the kinematical response quantities appropriately selected is used, and its beneficial effects, considered in conjunction with that of the beam anisotropy and structural pretwist upon the eigenvibration characteristics are highlighted

1. 서론

회전보 형태의 블레이드는 제트 엔진, 터보 머신, 팬블 모터 및 헬리콥터등이 있다. 그러한 블레이드들은 다양한 환경조건 및 높은 회전속도에서 작용하기 때문에 효율성 및 성능을 개선하기 연구들이 이루어지고 있다. 최근에 이르러 이방성 재료인 복합재료는 회전 블레이드를 개선함에 있어서 고강도, 중량절감 그리고 구조적인 테일러링을 통해서 정적과 동적응답을 효과적으로 제어하는데 충분한 수단을 제공해준다는 장점을 가지고 있기 때문에 복합재료를 모델로 한 블레이드의 구조해석이 활발히 연구되고 있다.

그러나 블레이드의 동적거동을 증강시키고, 진동으로 인한 피로파괴를 피하기 위해서 적층각 및 두께를 조절하는 테일러링 기법은 단지 수동적인 역할밖에 할 수가 없기 때문에 새로운 패러다임이 필요하게 되었다. 그러한 목적을 달성하기 위한 하나의 방법은 주 구조물에 압전재료를 포함시키는 방법이다[1,2].

그러한 구조물을 지능형 또는 스마트 구조물이라 한다. 종래의 수동구조물에 비해 스마트구조물은 공진을 피하거나 동적응답특성을 높임으로써 고유진동수, 댐핑, 모드형상을 조절함으로써 구조적인 공진, 플로터 불안정성을 피하고, 동적응답특성을 증강시킬수가 있다. 또한 헬리콥터와 틸트로터에 능동제어기법을 도입함으로써 피로수명 및 안락함을 효과적으로 증가시킬수 있다.

이러한 관점에서 압전재료는 감지기 및 작동기의 역할에 대해서 뛰어난 매개체가 된다.

본 논문에서는 횡전단효과, 1차 2차 와핑효과를 포함하여 플랩과 래깅굽힘이 연성되어 나타나는 초기 비틀림을 갖는 회전보에 대한 진동해석이 연구되었다.

* 충남대학교 대학원 기계공학과
** 충남대학교 공과대학 기계공학과

2. 이론해석

2.1 구조 모델링 및 기본가정

일정한 각속도 ΩJ로 회전하는 초기 비틀림각을 갖는 유연보가 고려된다.(Fig. 1) 회전축(x, y, z)의 원점은 옵셋 R_o에서 블레이드의 뿌리에 위치하고있다. 여기서 R_o는 허브의 반지름을 나타낸다.

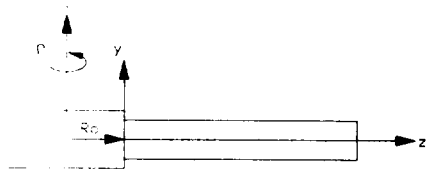

Fig. 1 Configuration of rotating blade

좌표계 (x,y,z) 이외에도, 임의의 단면보에 대해서 주축인 국소좌표계(x^p, y^p, z^p) 를 정의한다. 이 두 좌표계는 다음의 변환공식과 관련된다. 변환행렬을 이용하면 다음과 같이 나타낼수가 있다.

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\beta(z) & -\sin\beta(z) \\ \sin\beta(z) & \cos\beta(z) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x^p \\ y^p \end{pmatrix} \quad (1\text{-a})$$

$$\beta(z) = \beta_0 z/L \quad (1\text{-b})$$

여기서 β_0는 단위 길이당 초기 비틀림각을 나타낸다.

현 연구에서는 블레이드의 초기 원추각과 전진각은 없고 일정한 각속도 Ω로 회전한다고 가정을 한다. 구조모델은 얇은 벽보이며, 균일한 단면을 갖는 단일셀 얇은 벽보를 고려한다. 이 보 모델에 대해서 다음과 같은 가정을 한다. 1) 보의 원래 단면이 유지된다. 2) 재 1차, 2차 와핑효과를 포함한다. 3) 횡전단 및 원심가속도를 고려한다.

2.2 해밀턴의 변분원리

회전보의 운동방정식과 경계조건을 유도하기 위하여 해밀턴의 변분원리가 적용된다.

$$\delta J = \int_{t_0}^{t_1} (\delta U - \delta K) dt = 0 \quad (2)$$

$U = \frac{1}{2}\int_\tau \sigma_{ij}\delta\varepsilon_{ij}\, d\tau$, $K = \frac{1}{2}\int_\tau \rho(\dot{R}\cdot\dot{R})\, d\tau$ 은 각각 변형에너지 및 운동에너지이다.

2.2.1 변위와 변형률의 관계

각 변위변수의 함수로 표시된 변위벡터는 다음과 같다.

$$u(s,z;t) = u_o - y(s)\,\phi(z,t) \quad (3\text{-a})$$

$$v(s,z;t) = v_o + x(s)\,\phi(z,t) \quad (3\text{-b})$$

$$\begin{aligned} w(s,z;t) &= w_o + \theta_y(z;t)\left[x(s) + n\frac{dy}{ds}\right] \\ &\quad + \theta_x(z;t)\left[y(s) - n\frac{dx}{ds}\right] \\ &\quad - \phi'(z;t)\left[F_w(s) + na(s)\right] \end{aligned} \quad (3\text{-c})$$

식(3)에서 u_o , v_o , w_o 는 각각 x, y, z축에 대한 병진변위를 나타내며, θ_x, θ_y, ϕ는 x, y축에 대한 회전 및 z축에 대한 탄성비틀림을 나타낸다. 또한 기학학적인 양 $a(s)$ 및 θ_x , θ_y는 다음과 같이 표시할 수 가 있다.

$$\theta_x(z,t) = \gamma_{yz}(z,t) - v_o'(z,t) \quad (4\text{-a})$$

$$\theta_y(z,t) = \gamma_{xz}(z,t) - u_o'(z,t) \quad (4\text{-b})$$

$$a(s) = -y(s)\frac{dy}{ds} - x(s)\frac{dx}{ds} \quad (4\text{-c})$$

식(3)에서 $F_w(s)$ 와 $na(s)$는 각각 제1차 및 2차 와핑함수의 역할을 한다.

또한 축변형률은 다음과 같이 나타낼수가 있다.

$$\begin{aligned} \varepsilon_{zz} = {} & w_o' + x(s)\theta_y' + y(s)\theta_x' - F_w(s)\phi'' \\ & + \frac{1}{2}\left[(u_o' - y\phi')^2 + (v_o' + x\phi')^2\right] \\ & + \theta_y' d\frac{y}{ds} - \theta_x' d\frac{x}{ds} - a(s)\phi'' \end{aligned} \quad (5\text{-a})$$

전단변형률성분은 다음과 같다.

$$\gamma_{sz} = (u_o' + \theta_y)\frac{dx}{ds} + (v_o' + \theta_x)\frac{dy}{ds} + 2\frac{A_c}{\beta_1}\phi'$$

$$\gamma_{zn} = (u_o' + \theta_y)\frac{dy}{ds} - (v_o' + \theta_x)\frac{dx}{ds} \quad (5\text{-b,c})$$

2.2.2 운동에너지 및 변형에너지

블레이드의 변형후의 위치벡터는 다음과 같이 표현할 수가 있다.

$$R(x,y,z;t) = (x+u)i + (y+v)j + (z+w)k + R_o \quad (6\text{-a})$$

또한 회전속도가 일정하다면, 그 때 속도 및 가속도 벡터을 얻을 수 있다.

$$\dot{R} = v_x i + v_y j + v_z k \quad (6\text{-b})$$

$$\ddot{R} = a_x i + a_y j + a_z k \qquad (6\text{-c})$$

여기서 $v_x = \dot{u} + (R_o + z + w)\Omega$; $v_y = \dot{v}$

$$v_z = \dot{w} - (x+u)\Omega$$

$$a_x = \ddot{u} + \underline{2\dot{w}\Omega} - (x+u)\Omega^2 \; ; \; a_y = \dot{v}$$

$$a_z = \ddot{w} - \underline{2\dot{u}\Omega} - (R_o + z + w)\Omega^2$$

여기서 실선부분은 코리올리 항을 나타낸다.

식(3-6)을 운동에너지의 변분에 대입하여 정리하면 다음과 같은식을 얻을수가 있다.

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta K dt \equiv -\int_{t_1}^{t_2}\int_z \{-[\, b_1(\ddot{u}_o + 2\dot{w}_o\Omega - u_o\Omega^2)\delta u_o$$
$$+ b_1 \ddot{v}_o \delta v_o + b_1[\, \ddot{w}_o - 2\dot{u}_o\Omega - (R_o + z + w_o)\Omega^2]\delta w_o$$
$$+ I_{yy}(\ddot{\theta}_y - \Omega^2\theta_y)\delta\theta_y + [I_{xx}(\ddot{\theta}_x - \Omega^2\theta_x)]\delta\theta_x$$
$$+ [I_p\ddot{\phi} - 2I^o_{xx}\Omega\dot{\theta}_x - I^o_{xx}\Omega^2\phi - I_{ww}(\ddot{\phi}'' - \Omega^2\phi'')]\delta\phi\}\, dz$$
$$- [I_{ww}(\ddot{\phi}' - \Omega^2\phi')]\delta\phi]_o^L dt \qquad (7)$$

마찬가지로 변형에너지의 변분은 다음과 같이 표현할수가있다.

$$\delta U = [\, T_z \delta w_o + M_y \delta\theta_y + M_x \delta\theta_x - B_w \delta\phi'$$
$$+ \{B_w' + M_p + T_r(\phi' + \beta')\}\delta\phi + (T_z u_o' + Q_x)\delta u_o$$
$$+ (T_z v_o' + Q_y)\delta v_o]_0^L - \int_0^L [\, T_z' \delta w_o' + (M_y' - Q_x)\delta\theta_y$$
$$+ (M_x' - Q_y)\delta\theta_x + \{B_w'' + (T_r(\phi' + \beta'))' + M_p'\}\delta\phi$$
$$+ \{(T_z u_o')' + Q_x'\}\delta u_o + \{(T_z v_o')' + Q_y'\}\delta v_o]dz \qquad (8)$$

2.3 지배 방정식

초기 비틀림을 고려하여 식(7),(8)을 식(2)에 대입하면 플랩과 래깅굽힘이 연성되어 나타나는 운동방정식 및 경계조건을 다음과 같이 구할 수가 있다.

$$\delta u_o : \; [a_{41}(z)(u_o' + \theta_y) + a_{43}(z)\theta_x' + a_{45}(z)(v_o'$$
$$+ \theta_x)]' + b_1\Omega^2[R(z)u_o']' + b_1\Omega^2 u_o - b_1\ddot{u}_o = 0$$

$$\delta v_o : \; [a_{55}(z)(v_o' + \theta_x) + a_{52}(z)\theta_y' + a_{45}(z)(u_o'$$
$$+ \theta_y)]' + b_1\Omega^2[R(z)v_o']' - b_1\ddot{v}_o = 0$$

$$\delta\theta_y : [a_{22}(z)\theta_y' + a_{25}(z)(v_o' + \theta_x) + a_{23}(z)\theta_x']'$$
$$- a_{43}(z)\theta_x' - a_{44}(z)(u_o' + \theta_y) - a_{45}(z)(v_o' + \theta_x)$$
$$- I_{xy}\ddot{\theta}_x - I_{yy}(\ddot{\theta}_y - \Omega^2\theta_y) - I_{xy}(\ddot{\theta}_x - \Omega^2\theta_x) = 0 \qquad (9\text{-a,b,c})$$

$$\delta\theta_y : [a_{33}(z)\theta_x' + a_{23}(z)\theta_y' + a_{34}(z)(u_o' + \theta_y)]'$$
$$- a_{52}(z)\theta_y' - a_{54}(z)(u_o' + \theta_y) - a_{55}(z)(v_o' + \theta_x)$$
$$- I_{xy}\ddot{\theta}_y - I_{xx}(z)(\ddot{\theta}_x - \Omega^2\theta_x) - I_{xy}(\ddot{\theta}_y - \Omega^2\theta_y) = 0 \qquad (9\text{-d})$$

블레이드의 고정단 (z=0) 및 자유단 (z=L)에서의 경계조건들은 다음과 같다.

z=0에서 $\quad u_o = v_o = \theta_y = \theta_x = 0 \qquad (10\text{-a})$

z=L에서

$$\delta u_o : \; a_{44}(z)(u_o' + \theta_y) + a_{43}(z)\theta_x'$$
$$+ a_{45}(z)(v_o' + \theta_x) = 0$$

$$\delta v_o : \; a_{55}(z)(v_o' + \theta_x) + a_{52}(z)\theta_y'$$
$$+ a_{45}(z)(u_o' + \theta_y) = 0$$

$$\delta\theta_y : a_{22}(z)\theta_y' + a_{25}(z)(v_o' + \theta_x) + a_{23}(z)\theta_x' = M_y^a$$

$$\delta\theta_x : a_{33}(z)\theta_x' + a_{34}(z)(u_o' + \theta_y) + a_{23}(z)\theta_y' = M_x^a \qquad (10\text{-b,c,d,e})$$

2.4 피드백 제어법칙

주 구조물은 r 개의 레이어로 적층 되어있고, 반면에 작동기는 p 개의 압전층으로 구성 되어있다고 가정한다. 또한 작동기는 블레이드의 길이방향에 대해서 전영역에 분포되어있고, s, n 방향으로 다음과 같이 분포되어있다.

$$P_k(n) = H(n - n_{k-}) - H(n - n_{k+})$$
$$P_k(s) = H(s - s_{k-}) - H(s - s_{k+}) \qquad (11\text{-a,b})$$

여기서 P는 공간함수이고, H(·) 는 Heaviside 분포를 나타낸다. 또한 첨자 k는 k번째 층을 나타낸다. 전기장 ε_i 는 분극방향인 n 방향에서의 성분 ε_3로 표시한다고 하면, 경계 제어모멘트는 다음과 같이 표시한다.

$$M_x^a = \oint \sum_{k=1}^{n} \varepsilon_3^{(k)}(n_{k+} - n_{k-}) e_{31}^{(k)} P_k(s)$$
$$[\, y(1 - \frac{A_{12}}{A_{11}}) + \frac{dx}{ds}\frac{B_{12}}{A_{11}}]ds$$
$$- \frac{1}{2}\oint \frac{dx}{ds} \sum_{k=1}^{n} \varepsilon_3^{(k)}(n_{k+}^2 - n_{k-}^2) e_{31}^{(k)} P_k(s)]ds$$

$$M_y^a = \oint \sum_{k=1}^{p} \varepsilon_3^{(k)}(n_{k+} - n_{k-}) e_{31}^{(k)} P_k(s) \left[x\left(1 - \frac{A_{12}}{A_{11}}\right) + \frac{dy}{ds}\frac{B_{12}}{A_{11}} \right] ds + \frac{1}{2} \oint \frac{dy}{ds} \sum_{k=1}^{p} \varepsilon_3^{(k)}(n_{k+}^2 - n_{k-}^2) e_{31}^{(k)} P_k(s)] ds \quad (12\text{-a,b})$$

여기서 e_{31}은 압전상수이고, A_{ij}와 B_{ij}는 압전작동기와 관련된 국소강성량이다.

식(12)에서 ε_3가 압전작동기의 두께에 대해서 일정하다고 하면 $\varepsilon_3^{(k)} = \varepsilon_3$을 의미하며 식(12)를 다음과 같이 간단히 표현할 수가 있다.

$$M_x^a = \varepsilon_3 \widetilde{M}_x \ , \quad M_y^a = \varepsilon_3 \widetilde{M}_y \quad (13)$$

압전요소들이 감지기 및 작동기의 역할을 동시에 작용한다고 가정하면, 감지기 작동에 대한 압전재료의 전기적 변형은 $D_3 = e_{31}\varepsilon_{zz}$로 나타낼 수 있다. 그리고 감지기 출력전압은 다음과 같다.

$$V_s(t) = \frac{q_s(t)}{C_p} \quad (14)$$

여기서 $q_s(t) = \int_{A_s} D_3 dA_s = \int_{A_s} e_{31}\varepsilon_{zz} dA_s$이고, C_p 와 A_s는 감지기의 정전용량 및 압전필름의 부착면적을 나타낸다. 감지기의 패치(patch)들은 각각 상하단에 대칭적으로 부착되어있고, s 방향을 따라서 x, y축에 대해서 대칭적으로 분포한다고 가정하면, 그때 $V_s^x(t) = C_x^s \theta_x(L,t)$ $V_s^y(t) = C_y^s \theta_y(L,t)$이 된다.

여기서 C_x^s 와 C_y^s는 압전감지기의 형상과 부착위치에 따른 영향을 나타내는 상수이다.

두 경우의 피드백 제어법칙이 적용된다. 첫째는 비례제어로서 압전감지기로부터 측정한 전압은 전기장과 비례한다. 그때의 전기장은 다음과 같다.

$$\varepsilon_3^x(t) = K_p V_s^x(t)/h_a \ , \quad \varepsilon_3^y(t) = K_p V_s^y(t)/h_a \quad (15)$$

둘째는 속도귀환제어로서 압전감지기로부터 측정한 전압식에 게인을 곱하여 이를 간단한 전기회로를 이용하여 이에 비례하는 전기장을 작동기에 가한다고 가정하면 전기장은 다음과 같다.

$$\varepsilon_3^x(t) = K_v \frac{dV_s^x(t)/dt}{h_a} \ , \qquad \varepsilon_3^y(t) = K_v \frac{dV_s^y(t)/dt}{h_a} \quad (16)$$

여기서 h_a는 압전작동기의 두께를 나타낸다.

결과적으로 식(15-16)로 표현된 감지기에 의해 발생된 제어전기장을 가해진 전기장에 따른 압전작동기에서 발생하는 제어모멘트식 (13)에 대입하여 정리하면 제어모멘트를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

1) 비례제어

$$M_y^a(L,t) = \frac{K_p C_{M_y^s}}{h_a}[C_y^s \theta_y(L,t)] \quad (17\text{-a})$$

$$M_x^a(L,t) = \frac{K_p C_{M_x^s}}{h_a}[C_x^s \theta_x(L,t)] \quad (17\text{-b})$$

2) 속도피드백 제어

$$M_y^a(L,t) = \frac{K_v C_{M_y^s}}{h_a}[C_y^s \dot{\theta}_y(L,t)] \quad (17\text{-c})$$

$$M_x^a(L,t) = \frac{K_v C_{M_x^s}}{h_a}[C_x^s \dot{\theta}_x(L,t)] \quad (17\text{-d})$$

여기서

$$C_{M_x^s} = \sum_{k=1}^{p} e_{31}^{(k)} [(1 - \frac{A_{11}}{A_{12}})(n_{(k+)} - n_{(k-)})c + (n_{(k+)}^2 - n_{(k-)}^2) - 2\frac{B_{12}}{A11}(n_{(k+)} - n_{(k-)})] p_2$$

$$C_{M_y^s} = \sum_{k=1}^{p} e_{31}^{(k)} [(1 - \frac{A_{11}}{A_{12}})(n_{(k+)} - n_{(k-)})b + (n_{(k+)}^2 - n_{(k-)}^2) - 2\frac{B_{12}}{A11}(n_{(k+)} - n_{(k-)})] p_1 \quad (18)$$

그리고 비례 및 속도귀환 제어이득 K_p, K_v를 무차원화하면 다음과 같다.

$$\overline{K_p} = \frac{K_p L}{a_{33} h_p} \ , \quad \overline{K_v} = \frac{K_v L}{a_{33} h_p} \quad (19\text{-a,b})$$

2.5 회전보에 대한 지배방정식의 이산화

실제적인 목적을 위하여 고유치 문제를 이산화하는 것이 필요하다. 즉 각각의 변위들 u_o , v_o를 공간 및 시간에 대한 함수의 곱으로 일반화 한다. 확장된 Galerkin 법을 이용하면 쉽게 이산화할 수가 있다.

결국 변위들은 다음과 같이 표현할 수가 있다.

$$u_o(z,t) = U_o^T(z) q_u(t) \quad v_o(z,t) = V_o^T(z) q_v(t)$$
$$\theta_x(z,t) = X_o^T(z) q_x(t) \quad \theta_y(z,t) = Y_o^T(z) q_y(t) \quad (20)$$

여기서

$U_n(z)=[u_1, u_2 \cdots u_N]^T \quad V_o(z)=[v_1, v_2 \cdots v_N]^T$

$X_n(z)=[x_1, x_2 \cdots x_N]^T \quad Y_o(z)=[y_1, y_2 \cdots y_N]^T$

윗 식들은 적어도 기하학적인 경계조건들을 만족하는 시험함수(trial function)들에 대한 벡터들이다. 반면에 자유진동 문제에 대해서 일반좌표계 $q_u(t)$, $q_v(t)$, $q_x(t)$, $q_y(t)$들은 다음과 같이 일반적인 식으로 표시할 수가 있다.

$$F(t)=\overline{F}\, e^{\lambda t} \tag{21}$$

$\overline{F}$ 와 λ 는 상수들이며, 일반적으로 복소수들이다. $\overline{K_r}\neq 0$ 인 경우 고유치 문제의 해는 다음과 같은 형태로 표현된다.

$$(\lambda_r, \overline{\lambda_r})=\sigma_r \pm i\omega_{dr} \tag{22}$$

여기서 σ_r 은 r 번째 모드의 감쇠치이며, ω_{dr} 은 r 번째 감쇠진동수이다. 그리고 r 번째 모드에서의 감쇠비(damping factor)는 다음과 같다.

$$\zeta_r=-\frac{\sigma_r}{(\sigma_r^2+\omega_{dr}^2)^{1/2}} \tag{23}$$

$\overline{K_r}=0$이고, $\overline{K_p}\neq 0$인 경우에 $(\lambda_r, \overline{\lambda_r})=\pm i\omega_{dr}$ 이고, 이 식은 비 감쇠자유진동에 대한 해가 된다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 그림2 에서처럼 단면비 c/b=5인 복합재료 상자보로 모델링한 회전보의경우를고려한다. 압전작동기의 레이어들은 상단 및 하단플랜지상에 위치해 있고, 주 구조물의 반대 종방향으로 웨브가 있다.

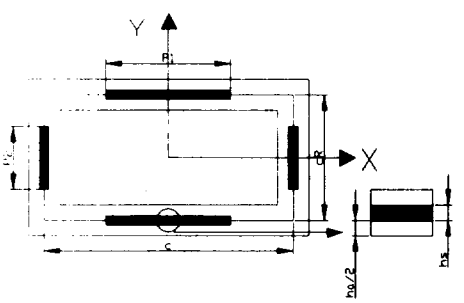

Fig. 2 Configuration of cross-section area

구조물의 기하학적인 특성 및 graphite /epoxy 재료에 대한 기계적인 특성은 다음과 같다. PZT-4 압전세라믹의 특성은 참고문헌 4 에 있다.

b=2, c=10, L=80, R=Ro/L

$E_L= 30\times10^6$ psi , $E_T= 0.75\times10^6$ psi

$G_{LT}= 0.37\times10^6$ psi , $G_{TT}= 0.45\times10^6$ psi ,

$\mu_{TT}=\mu_{LT}=0.25$, $\rho=14.3\times10^{-5} lb\cdot sec^2$

여기서 첨자 L과 T는 각각 섬유방향 및 횡방향을 나타낸다.

Table 1은 회전속도에 따른 초기 비틀림의 영향을 보여준다. 보가 회전하지 않는 경우에 1차 모드의 고유진동수는 약간 증가하고, 2차 모드는 감소, 3차 모드의 고유진동수는 큰 폭으로 증가하는 것을 볼수 있다. 하지만 보가 회전하면 오히려 1차 모드의 주파수는 감소하며 , 2차 모드도 일정한 회전속도 200 rad/s에 도달하면 증가하는 경향을 보인다. 이러한 경향은 여러 참고문헌에서도 찾아볼수가 있다[4-7].

Table 1 Effect of pretwisted angle on natural frequency for different rotation speed (θ =45°)

Ω	Mode No.	pretwisted angle βo			
		0°	30°	60°	90°
0	1st	58.2	58.28	58.75	59.53
	2nd	197.77	189.32	171.3	152.68
	3rd	360.74	377.85	419.63	473.47
100	1st	128.37	128.06	127.12	125.52
	2nd	205.90	201.19	189.87	176.85
	3rd	450.38	462.32	494.14	538.64
200	1st	227.441	223.44	215.84	206.78
	2nd	232.137	234.13	235.81	236.75
	3rd	647.059	654.2	672.38	701.5

그림 3 은 섬유각이 0° 인 즉 비연성 플랩과 래깅 모드에서의 회전속도에 따른 비례제어 이득의 효과를 나타낸다. 적당한 회전속도에서 1차 플랩모드가 최저주파수가 된다. 하지만 일정한 회전속도가 되면, 원심강성효과로 인하여 래깅모드가 최저주파수가 되는 것을 볼수가 있다. Ω=150 rad/s 근방에서 비 능동보(unactivated beam)에 대해서, 각각의 플랩과 래깅 고유진동수는 서로 교차하게 된다.

능동보에 대해서는 고유진동수의 교차점이 더 큰 회전속도에서 일어나는 것을 볼수가 있다. 또한 플랩 모드 보다 래깅모드에서 압전의 효과는 강력함을 보여준다. 이러한 경향은 고주파수에서도 마찬가지로 나타난다.

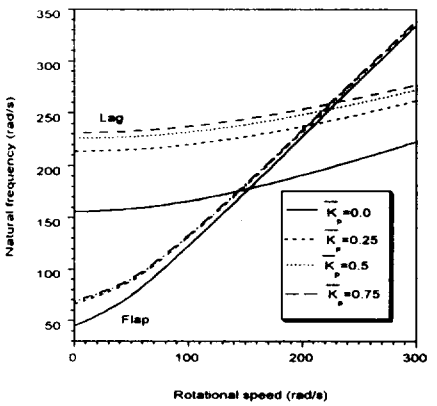

Fig. 3 Variation of the 1st flap, lag natural frequency vs. proportional control gain (θ =0° Ω =0 rad/s)

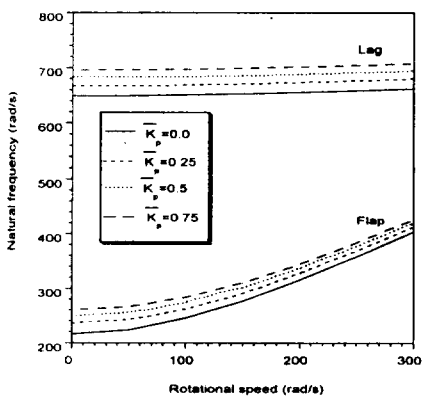

Fig. 4 Variation of the 1st flap, lag natural frequency vs. proportional control gain (θ =90° Ω =0 rad/s)

그림 4 는 섬유각이 90°인 경우에 대해서 고유진동수의 변화를 보이고 있다.
그림 3 의 섬유각이 0°인 경우와 유사한 경향을 보여준다. 하지만 더 큰 굽힘강성으로 인하여 고유진동수는 θ =0° 에 대해서 보다 회전속도의 범위가 더 크게 나타난다. 그리고 고유진동수의 교차점은 훨씬 높은 회전속도에서 발생한다.

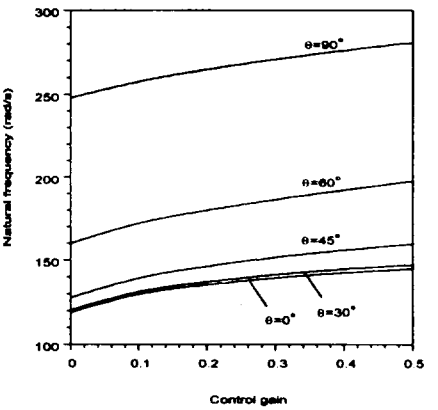

Fig. 5 Variation of the 1st natural frequency vs. proportional control gain (Ω =100 rad/s)

그림5는 테일러링 및 압전의 액츄에이팅에 대한 효과를 보여준다. actuating에 대한 효과는 비교적 적당하게 나타난다. 하지만 섬유각이 증가함에 따라서 테일러링의 효과는 아주 크게 나타난다.

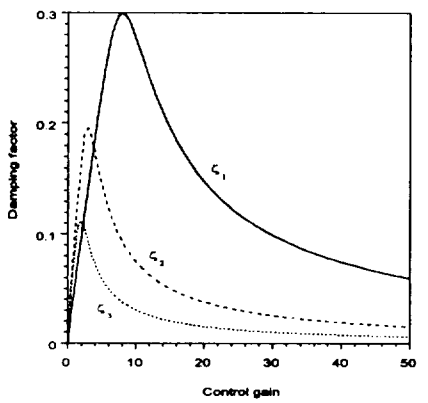

Fig. 6 Damping factors in flapping vs. velocity control gain (θ =0° Ω =0 rad/s)

그림 6과 7은 플랩과 래깅에 대해서 속도제어이득에 따른 감쇠비의 영향을 보여준다. 이득값이 증가함에 따라서 감쇠비는 급속히 증가하다가, 이득값이 일정한 값에 도달하면 sharp drop이 발생한다.또한 플랩모드 보다 래깅모드에 더 큰 이득값을 줌으로써 감쇠비를 줄일수 있음을 보여준다.

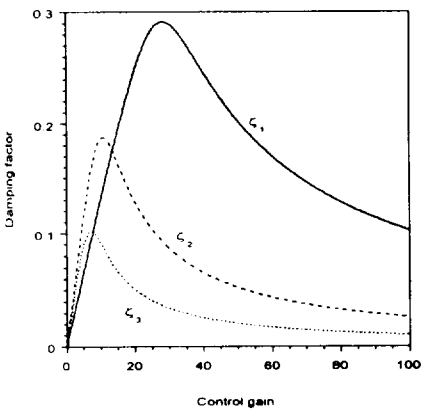

Fig. 7 Damping factors in lagging vs. velocity control gain (θ =0° Ω=0 rad/s)

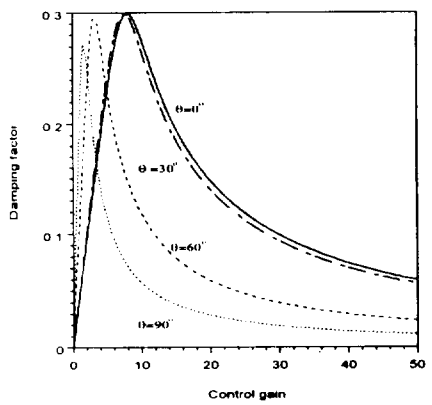

Fig. 8 1st damping factors vs. velocity control gain for different ply angles (θ =0° Ω=0 rad/s)

그림 8은 섬유각에 따른 감쇠비의 효과를 보여준다. 섬유각이 작은 각도보다 큰 섬유각에서 낮은 이득값에서 sharp drop이 발생한다.

4. 결 론

본 논문에서는 해밀턴 변분원리로부터 복합재료 얇은 벽보로 모델로한 초기 비틀림을 갖고 회전하는 탄성 블레이드에 대한 운동방정식과 경계조건이 유도하였다. 또한 압전재료를 복합재료의 구조물에 삽입함으로써 구조물의 응답거동에 대한 제어를 가능하게 하였다. 이러한 테일러링 기법 및 압전재료를 이용한 능동제어기법을 도입함으로써 블레이드의 주파수응답을 높일수 있다는 것을 알 수가 있었다.

5. 참고문헌

(1) Song, O. and Librescu, L., "Modeling and Dynamic Behavior of Rotating Blades Carrying a Tip Mass and Incorporating Adaptive Capabilities," Acta Mechanical 134,pp.169-197,1999.

(2) Tzou, H.S., " Piezoelectric Shells: Distributed Sensing and Control of Continua," Dordrecht /Boston/London,Kluwer, 1993.

(3) Berlincourt, D.A., Curran, D. "R. ad Jaffe, H., "Piezoelectric and Piezomagnetic Materials and Their Function in Transducers," Physicla Acoustics-Principles and Methods, Vol. 1. Pt. A, Academic Press,New York, pp 202-204,1964.

(4) Subrahmanyam, K. B., Kulkarni, S. V., and Rao, J.S., " Coupled Bending-Bending Vib. of Pretwisted Blading Allowing for Shear Deformation and Rotary Inertia by the Reissner Method, "International Journal of Mechanical Sciences.Vol.23,9, pp.517-530, 1981.

(5) Subrahmanyam, K. B. and Kaza, K. R. V., "Vibration and Buckling of Rotating Pretwisted, Preconed Beams Including Coriolis Effects," Journal of Vibration, Acoustics, Stress and Reliability in Design, Vol. 108, pp. 140-149, April 1986.

(6) Slyper, H.A., " coupled Bending Vibrations of Pretwited Cantilever Beams," Journal Mechanical Engineering Sciences, 4, pp 365-379, 1962.

(7) Carnegic W., and Thomas, J., "The Effects of Shear Deformation and Rotary Interia on the Lateral Frequencies of Cantilever Beams in Bending," Journal of Engineering for Industry, Trans. ASME, Feb. pp. 267-278, 1972