

# Piezocomposite 재료를 사용한 회전하는 블레이드의 진동억제

최승찬\* · 김지환\*\*

## Vibration suppression of rotating blade with piezocomposite materials

Seung-Chan Choi and Ji-Hwan Kim

### Abstract

The main purpose of this study is the vibration suppression of rotating composite blade containing distributed piezoelectric sensors and actuators. The blade is modeled by thin-walled, single cell composite beam including the warping function, centrifugal force, Coriolis acceleration and piezoelectric effect. Further, the numerical study is performed using finite element method. The vibration of composite rotor is suppressed by piezocomposite actuators and PVDF sensors that are embedded between composite layers. A velocity feedback control algorithm coupling the direct and converse piezoelectric effect is used to actively control the dynamic response of an integrated structure through a closed control loop. Responses of the rotating blade are investigated. Newmark time integration method is used to calculate the time response of the model. In the numerical simulation, the effect of parameters such as rotating speed, fiber orientation of the blade and size of actuators are studied in detail.

**Key Words:** Rotating composite blade, Piezocomposite materials, velocity feedback control

### 1. 서 론

블레이드는 항공 및 기계분야에 널리 사용되는 필수적인 구조물이다. 최근에는 비강성 및 비강도 증가와 경량화 등의 목적을 위해 복합재료가 블레이드의 제작에 많이 사용되는데, 복합재료는 유연한 특성을 지니고 있으므로 진동 특성에 대한 해석 및 억제 방법이 시스템의 성능과 밀접한 관계를 갖는다. 최근에는 지능재료를 사용한 진동 억제 및 제어에 대한 연구가 매우 활발하게 진행되고 있으며, 항공기의 날개와 로터 블레이드, 인공위성 구조물 등의 진동 문제에 대한 지능재료의 응용은 중요한 연구주제가 되고 있다.

지능재료를 사용한 구조물의 진동 억제에 대한 연구사례를 살펴보면, Lam 등[1]은 압전재료와

속도피드백제어 알고리즘을 사용한 복합재료 평판의 진동 제어에 대한 연구를 수행하였으며, Mukherjee 등[2]은 압전재료를 사용한 평판의 능동 진동제어와 보강재의 영향을 조사하였다. 그리고, Song 등[3]은 속도/비례제어를 사용한 블레이드의 진동에 대해 연구하였으며, Koldoff 등[4]은 압전작동기를 사용한 복합재료 상자형보(Box beam)의 능동제어에 대한 연구를 수행하였다. 이러한 진동제어에 주로 사용되는 압전세라믹은 반응속도가 빠른 장점이 있으며, 주 구조물에 압전센서와 작동기를 부착시키거나 삽입시키는 방법이 많이 사용된다. 그러나, 압전세라믹은 취성(brittleness)을 가지고 있기 때문에 충격에 약하고 곡면 부위에 부착하기 어렵다. 이러한 단점을 극복하고 보다 향상된 작동 성능을 얻기위해 Bent[5]와 Wilkie[6] 등에 의해서 AFC(Active Fiber Composite) 또는 MFC(Macro Fiber Composite) 같은 Piezocomposite 재료가 개발되었고, 그의 응용에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

\* 서울대학교 대학원 기계항공공학부

\*\* 서울대학교 기계항공공학부 교수

본 논문에서는 유한요소법을 기반으로 하고 속도 피드백제어 알고리즘을 사용한 회전하는 복합재료 로터 블레이드의 진동 억제에 대한 연구를 수행하였다. 블레이드는 1차원 박벽보(Thin-walled beam)로 모델링 되었으며, 센서로는 PVDF 필름을, 작동기로는 AFC 또는 MFC를 사용하였다. 진동의 시간응답을 구하기 위하여 Newmark 시간적분법을 사용하였고, 복합재료의 적층각, 회전속도, 작동기의 분포에 따른 영향에 대해서 조사하였다.

## 2. 유한요소 정식화

본 연구에서는 3차원 형상의 블레이드를 1차원 모델로 축약시키기 위해 참고문헌[7]의 가정을 적용하였고, 공기력의 효과는 고려하지 않았다. 그에 따른 블레이드의 변위장은 다음과 같다.

$$u(x) = U(x) - (Y - nZ_{,y})\beta_{z,x}(x) + (Z + nY_{,y})\beta_{y,x}(x) + \psi(s)\phi_{,x}(x) \\ v(x) = V(x) - (Z + nY_{,y})\phi(x) \quad (1)$$

$$w(x) = W(x) + (Y - nZ_{,y})\phi(x)$$

그리고 블레이드의 임의의 위치에서의 변형 후 위치, 속도 및 가속도 벡터는 식(2)와 같다.

$$\bar{\mathbf{R}} = (x + u + R_n)\mathbf{i} + (y + v)\mathbf{j} + (z + w)\mathbf{k} \\ \bar{\mathbf{v}} = (\dot{u} - \Omega(y + v))\mathbf{i} + (\dot{v} + \Omega(x + u + R_n))\mathbf{j} + \dot{w}\mathbf{k} \\ \bar{\mathbf{a}} = (\ddot{u} - 2\Omega\dot{v} - \Omega^2(x + u + R_n))\mathbf{i} \\ + ((\ddot{v} + 2\Omega\dot{u} - \Omega^2(y + v))\mathbf{j} + \ddot{w}\mathbf{k}) \quad (2)$$

평면응력 가정에서 구성방정식은 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{e}_{mxx} \\ \bar{e}_{mys} \\ \bar{e}_{mxy} \end{bmatrix} E_n \quad (3)$$

여기서,  $E_n = -V/e_s$ 이며,  $\bar{e}_{mxx}, \bar{e}_{mys}, \bar{e}_{mxy}$ 는 변환된 압전응력상수,  $E$ 는 전기장,  $V$ 는 작동기 전압, 그리고  $e_s$ 는 전극간의 거리를 의미한다.

이에 따른 시스템의 변형에너지와 운동에너지는 다음과 같고,

$$U = \frac{1}{2} \int_V \int_V (N_{xx} \delta \varepsilon_{xx}^0 + N_{xy} \delta \gamma_{xy} + M_{xx} \delta \kappa_{xx}) ds dx + U_{CF} \\ T = \frac{1}{2} \int_V \int_V \rho v \cdot v ndns dx \quad (4)$$

여기서,  $U_{CF}$ 는 원심력에 의한 변형에너지이다. 식(4)을 Extended Hamilton's Principle에 적용하

고, 변분을 사용하여 정리하면 식(5)의 지배방정식이 유도된다.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{C}_c\dot{\mathbf{q}}(t) + (\mathbf{K}_L + \mathbf{K}_{CF} + \mathbf{K}_G)\mathbf{q}(t) \\ = \mathbf{F}_v + \mathbf{F}_{CF} + \mathbf{R}(t) \quad (5)$$

여기서,  $\mathbf{M}, \mathbf{C}_c, \mathbf{K}_L, \mathbf{K}_{CF}, \mathbf{K}_G, \mathbf{F}_{CF}$ 와  $\mathbf{R}(t)$ 은 각각 질량행렬, 코리올리행렬, 강성행렬, 원심력에 의한 강성행렬, 기하학적 강성행렬, 원심력 벡터 그리고 임의의 가진력을 의미하며, 전기적 힘 벡터  $\mathbf{F}_v$ 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\mathbf{F}_v = \int_V \mathbf{d}(\mathbf{HN})^T \mathbf{PE} ds dx = \mathbf{K}_{av} \mathbf{V}_a \quad (6)$$

순방향 압전효과로부터 센서 관계식을 유도할 수 있는데, 센서로는 두께가 얇은 PVDF 필름을 사용하고, 센서에는 외부 전압을 공급하지 않으며, 전하는 센서의 두께방향으로 생성되기 때문에 전기적 변위는  $D_3$ 만 고려된다[1,3].

$$D_3 = e_{31}\varepsilon_{xx} = e_{31}(U_{,x} - Y\beta_{z,x} + Z\beta_{y,x} + \psi\phi_{,xx}) \quad (7)$$

센서는 길이방향에 걸쳐 분포되어 있으며 센서 전체에서 발생하는 전하의 합과 그에 따라 생성되는 전류의 크기(8)는 다음과 같다.

$$i(t) = \frac{dq_s(t)}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{N_f} \int_A D_3 dA \right) \quad (8)$$

압전센서가 변형률센서로 사용될 때, 센서전류는 식(9)와 같은 개회로 센서전압으로 변환될 수 있다. ( $G_c$ 는 전류증폭기의 이득(gain))

$$V_s = G_c i(t) = G_c \frac{dq_s(t)}{dt} \quad (9)$$

그리고, 블레이드가 진동할 때, 센서에서 발생하는 전압 신호를 작동기로 피드백 시켜서 다음과 같은 작동기 전압을 발생시킬 수 있다.

$$\mathbf{V}_a = G_c G_i \mathbf{K}_{av} \dot{\mathbf{q}}(t) \quad (10)$$

여기서  $G_i$ 는 피드백제어에 공급되는 이득이다. 식(10)의 작동기 전압을 식(6)에 적용하면 전기적 힘 벡터는 식(11)과 같이 표현된다.

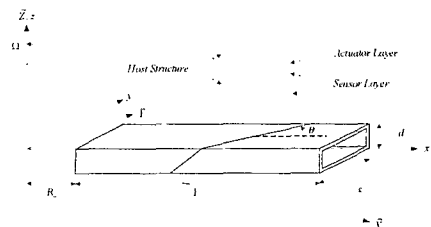


Fig. 1. Active blade model

Table 1. Natural frequency (Hz) [8]

Mode	Experiment (Chandra & Chopra)	Analysis (Smith & Chopra)	Analysis (Stemple & Lee)	Present
Flap1	28.60	28.13	27.33	27.65
Lag1	39.5	42.85	38.66	42.16
Flap2	135.0	139.8	133.6	135.7

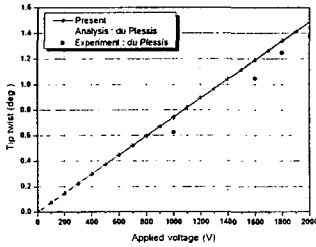


Fig.2. Tip twist induced by AFC actuators [7]

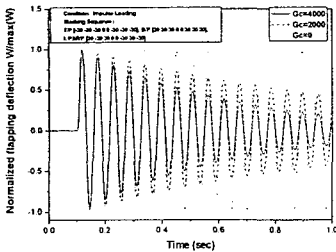


Fig.3. Variation of the response for the feedback gain

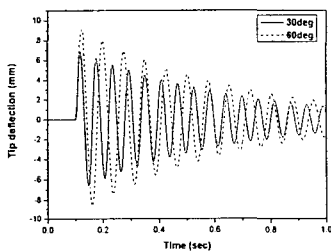


Fig.4. Influence for the ply-angle of the host structure

$$F_v = K_{av} G_c G_r K_v \dot{q}(t) = -C_v \dot{q}(t) \quad (11)$$

따라서 식(5)의 지배방정식은 식(12)과 같이 정리될 수 있으며, 위와 같은 알고리즘을 사용하여 시스템의 블레이드의 진동을 억제시키는 감쇠효과를 얻는 것이 가능하다.

$$M\ddot{q}(t) + (C_c + C_v)\dot{q}(t) + (K_L + K_{CF} + K_R)q(t) = F_{CF} + R(t) \quad (12)$$

또한, 시스템의 시간응답은 Newmark 시간적분법을 사용하여 계산하였다.

### 3. 수치해석결과 및 토의

먼저 해석 코드를 검증하기 위해 회전하는 블레이드의 고유진동수와 Piezocomposite 작동기의 작동성능 해석을 수행해 참고문헌과 비교하였다. Table.1은 적층각 30도에서 대칭으로 적층된 상자형호 형태의 블레이드가 1000RPM으로 회전할 때 3번째 모드까지의 고유진동수이고, Fig.2는 에어포일 형상의 블레이드에 삽입된 AFC 작동기의 전압에 따른 작동 성능을 나타낸다. 표와 그림으로부터 참고문헌과 본 연구의 결과가 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

속도피드백제어를 통한 감쇠효과를 조사하기 위해 Fig.1과 같은 블레이드 모델을 고려한다. 블레이드는 길이 844.5mm, 폭 23.1mm, 높이 12.6mm이며, 센서와 작동기는 G/E의 주구조물에 삽입되어있다. 센서증폭기의 이득값은 1000이고, 작동기는 스펠에 대해 0도로 적층된 것으로 가정한다. 여기서, 센서로는 PVDF, 작동기로는 MFC를 사용했다. Fig.3은 대칭 적층조건에서 500RPM으로 회전하는 블레이드의 Impulse load에 대한 시간응답을 보여준다. 피드백 이득값이 증가할수록 진동의 감쇠속도가 빨라지는 것을 알 수 있다. 그러나 작동기의 한계 전압 때문에 이득값을 무한히 크게 할 수는 없다. Fig.4는 주구조물의 적층각이 응답에 미치는 영향을 조사하기 위해 동일한 조건의 블레이드에 대한 적층각 변화에 따른 응답의 변화를 나타낸다. 주구조물의 적층각도가 작아질수록 응답의 크기도 작아지는 것을 확인할 수 있다. Fig.5는 회전속도에 따른 응답의 변화를 보여준다. 같은 조건에서 회전속도만 변화시킬 때, 진동의 시간응답이 변하게 되며 회전속도가 증가할수록 원심력에 의한 강성효과 때문에 진폭이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 복합재료의 적층각과 회전속도가 진동의 응답에 영향을 주는 것을 알 수 있다.

Fig.6은 이득값 등의 다른 조건은 모두 동일한 상태에서 작동기의 크기에 따른 settling time의 비교를 보여준다. 작동기의 분포가 블레이드의 뿌리부분에서 끝단방향으로 20%에서 100%까지 변할 때, 진동의 크기가 10%까지 감소되는 시간

## 후 기

본 연구는 Brain Korea 21의 지원에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

- [1] Lam, K.Y., Peng, X.Q., Liu, G.R. and Reddy, J.N. A finite element modeling for piezoelectric composite laminates. *Smart materials and structures*. Vol.6, No.5, Oct. 1997, pp.583-591.
- [2] Mukherjee, A., Joshi, S.P., Ganguli, A. Active vibration control of piezolaminated stiffened plates. *Composite structures*, Vol.55, No.4, 2002, p.435-443
- [3] Song, O., Librescu, L. and Oh, S.Y., Vibration of pretwisted adaptive rotating blades modeled as anisotropic thin-walled beams. *AIAA Journal*, Vol.39, No.2, Feb. 2001, pp.285-295.
- [4] Koldoff, J., Chattopadhyay, A., Nam, C. Active control of composite box beams using in-plane piezoelectric actuation and structural coupling with optimization. *Proc. Of SPIE Vol.3985, Smart structures and integrated systems*, ed. N. Wereley, March, 2000
- [5] Bent, A.A., Hagoood, N.W. Active fiber composite materials for structural actuation. PhD Thesis, Department of Aeronautics and Astronautics, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 1997.
- [6] Wilkie, W.K., Bryant, R.G., High, J.W., Fox, R.L., Hellbaum, R.F., Jalink, A.Jr., Little, B.D., and Mirick, P.H. Low-cost piezocomposite actuator for structural control applications. In: *Proceedings of SPIE, 7th International Symposium on Smart Structures and Materials*. Newport Beach, CA. 3991, 2000, pp.323-334.
- [7] du Plessis, Hagoood, N.W. Modeling and Experimental Testing of Twist Actuated Single Cell Composite Beam for Helicopter Blade Control. Master Degree Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 1996.
- [8] Jung, S.N., Nagaraj, V.T., Chopra, I. Refined structural dynamics model for composite rotor blades. *AIAA Journal*, Vol.39, No.2, Feb. 2001, pp.340-348.

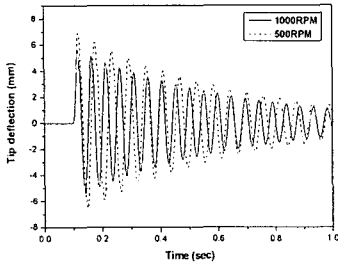


Fig.5. Influence for the rotating speed

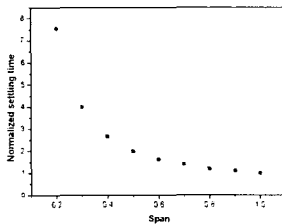


Fig.6. Variation of settling time for actuator size

을 측정 한 결과를 나타냈다. Fig.6와 같이, 작동기가 스패의 50% 이하의 크기로 부착될 경우, 감쇠 효과가 매우 감소하는 반면에, 스패의 70~100%의 크기로 부착되었을 경우에는 감쇠 효과가 크게 차이나지 않는 것을 확인할 수 있다. 일반적으로 작동기의 가격이 고가이고, 작동기 부착에 따라 시스템의 질량이 증가하게 되는 것을 감안할 때, 작동기의 적절한 배치와 크기 결정으로 작동기 사용량을 줄이면서 비슷한 진동 억제 효과를 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

## 4. 결 론

본 논문에서는 PVDF센서와 Piezocomposite작동기를 사용한 회전하는 복합재료 블레이드의 진동 억제에 대해 연구했다. 블레이드는 박벽모로 모델링 되었으며, 본 연구를 통해서 블레이드에 삽입된 센서와 작동기를 사용하여 적절한 피드백 이득값을 부여할 때 진동 억제효과를 얻을 수 있음을 확인했다. 복합재료의 적층각과 회전속도가 진동의 응답과 관계가 있는 것을 확인하였으며, 적절한 작동기의 배치와 사용을 통하여 효과적인 진동 억제 효과를 얻을 수 있음을 알 수 있었고, 이를 위해서는 최적화 관련 연구가 병행되어야 함을 확인할 수 있었다.