

# 다중 선트회로에 연결된 압전세라믹을 이용한 비선형 패널 플러터의 수동적 억제

문성환\*,<sup>0</sup> 김승조\*\*

## Passive Suppression of Nonlinear Panel Flutter Using Piezoceramics with Multi Resonant Circuits

Seong Hwan Moon, Seung Jo Kim

### ABSTRACT

Many analytical and experimental studies on the active suppression of nonlinear panel flutter by using piezoceramic patch have been carried out. However, these active control methods have a few important problems; a large amount of power is required to operate actuators, and additional apparatuses such as sensor systems and controller are needed. In this study passive suppression schemes for nonlinear flutter of composite panel, which is believed to be more robust suppression system than active control in practical operation, are proposed by using piezoelectric inductor-resistor series shunt circuit. Toward the end, a finite element equation of motion for an electromechanically coupled system is proposed using the Hamilton's principle. To achieve the best damping effect, optimal shape and location of the piezoceramic(PZT) patches are determined by using genetic algorithms. The results clearly demonstrate that the passive damping scheme by using piezoelectric shunt circuit can effectively attenuate the flutter.

### 1. 서론

패널 플러터는 패널이 초음속이나 극 초음속의 유동장에 놓여 있을 때 발생하는 공력탄성학적 불안정 현상이다. 지능구조물을 사용하여 이러한 패널 플러터를 억제시키기 위한 많은 연구와 실험들이 수행되어져 왔다. Scott 와 Weissarr<sup>1</sup>는 PZT 와 형상기억합금을 사용하여 Ritz 방법을 토대로 능동 및 수동제어를 통한 선형 플러터 해석을 수행하였다. Zhou<sup>2</sup>는 유한요소방법을 토대로 열 하중을 고려한 비선형 패널 플러터의 능동 제어에 대한 해석을 수행하였다. Hagood 와 Von Flotow<sup>3</sup>는 선트회로가 부착된 압전재료에 대하여 기계적 전기적 특성을 기술하는 방정식을 유도하였다. Hollkamp<sup>4</sup>는 보 모델에 대하여 다중의 인덕터와 저항이 병렬로 연결된 선트회로가 부착된 단 한 개의 압전재료를 가지고 다중의 모드를 제어할 수 있음을 보여 주었다. Tang<sup>5</sup>은 보 모델에 대하여 능동 및 수동 제어를 동시에 사용함으로써

진동을 제어할 수 있음을 보여주었다. Hollkamp 와 Gordon<sup>6</sup>는 2 차원의 형상을 갖는 판 모델에 대하여 수동제어방법을 적용하였다. 수동제어 방법을 토대로 헬리콥터의 힌지없는 로우터 블레이드의 래그모드에 대한 진동제어를 수행하였다.

본 연구에서는 인덕터와 저항기가 서로 직렬로 연결된 다중의 선트 회로가 부착된 압전세라믹을 사용함으로써 능동제어보다 더 안정적이며 전원 공급이 필요하지 않는 수동 제어 방법을 사용하여 비선형 패널 플러터에 대한 억제 연구가 수행되어진다. 다중의 선트 회로를 이용한 비선형 패널 플러터 억제를 위한 수동 제어 방법의 유한요소 정식화가 유도되어지며, 고전적층판이론(CLPT)과 von Karman 의 비선형 변위-변형을 관계식이 사용되어졌으며 공기력으로는 피스톤 1 차 이론을 사용하였다. 시스템의 최대 댐핑을 얻기 위해 압전세라믹의 최적 형상과 위치가 유전자 알고리즘을 바탕으로 결정되어진다. 적절한 플러터 모드들을 사용하여 모달 좌표변환을 통한 비선형 모달 방정식들이 얻어지며 Newmark- $\beta$  방법을 사용하여 제어된 결과들이 시간 영역에서 고찰되어진다.

\* 서울대학교 대학원 항공우주공학과

\*\* 정회원, 서울대학교 항공우주공학과

### 2. 구성방정식

압전재료의 기계적/전기적 연계 특성을 기술해 주는 구성방정식은 다음과 같이 표현 되어진다.

$$\sigma = c^D \varepsilon - h^T D \quad (1)$$

$$E = -h\varepsilon + \beta^S D$$

여기서,  $\sigma$ ,  $\varepsilon$ ,  $D$ ,  $E$  는 각각 응력, 변형률, 전기적인 변위 (단위면적당 전하량), 전기장(단위길이당 전위차)을 나타내 주며,  $h$ ,  $\beta$ ,  $c$  는 압전재료 상수, 유전 상수, 탄성계수를 의미한다. 위첨자  $D$  와  $S$  는 일정한 전기변위와 일정한 변형률을 의미한다.

평면응력 상태를 가정하고, 두께방향으로 분극이 되어진 압전재료에 대해서 압전상수  $h$  는 다음과 같이 표현 되어진다.

$$h = [h_{31} \quad h_{31} \quad 0] \quad (2)$$

여기서,

$$h_{31} = \frac{d_{31}(C_{11}^D + C_{12}^D)}{\varepsilon_{33}^T} = \frac{d_{31}E^D}{\varepsilon_{33}^T(1-\nu)}$$

여기서 위 첨자  $T$  는 일정한 응력상태를 의미하며  $\varepsilon$  는 유전상수를 의미한다.

그러면, 패닐이 온도변화  $\Delta T(x,y,z)$ 를 받고 있을 때 압전재료의 구성방정식 (1)은 다음과 같이 표현되어진다.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix}_p = \left( \frac{E^D}{1-\nu^2} \right)_p \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1-\nu)/2 \end{bmatrix}_p \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_{xy} \end{Bmatrix}_p$$

$$- \left( \frac{E^D \alpha}{1-\nu} \right)_p \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{Bmatrix} \Delta T - h_{31} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{Bmatrix}_p D_3$$

$$E_3 = \frac{1}{\varepsilon_{33}^S} D_3 - [h_{31} \quad h_{31} \quad 0] \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_{xy} \end{Bmatrix}_p^T \quad (3)$$

고전적층판이론(CLPT)을 바탕으로 변위는 다음과 같이 표현되어진다.

$$\begin{aligned} u(x,y,z,t) &= u_o(x,y,t) - z \partial w / \partial x \\ v(x,y,z,t) &= v_o(x,y,t) - z \partial w / \partial y \\ w(x,y,z,t) &= w_o(x,y,t) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서  $(u_o, v_o, w_o)$  는 중간면에서의 변위장을 나타낸다. von Karman 의 비선형 변위-변형률 관계식은 다음과 같이 표현되어진다.

$$\varepsilon = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u_{o,x} \\ v_{o,y} \\ u_{o,x} + v_{o,y} \end{Bmatrix} + \frac{1}{2} \begin{Bmatrix} w_{,x}^2 \\ w_{,y}^2 \\ 2w_{,x} + w_{,y} \end{Bmatrix} - z \begin{Bmatrix} w_{,xx} \\ w_{,yy} \\ 2w_{,xy} \end{Bmatrix} = \{\varepsilon_m\} + \{\varepsilon_\theta\} + z\{k\} \quad (5)$$

여기서  $\{\varepsilon_\theta\}$  는 비선형 면내 변형률을 나타낸다

## 2. 공기력 이론

마하수 1.7 이상 그리고 마하수 5 이하의 유동장에 놓여 있는 패닐에 작용하는 공기력은 피스톤 1 차 이론으로 적절하게 표현 할 수 있으며 다음과 같다.<sup>2</sup>

$$\begin{aligned} p_a &= -\frac{\rho_a V_\infty^2}{\beta} \left\{ \cos\phi \frac{\partial w}{\partial x} + \sin\phi \frac{\partial w}{\partial y} + \left( \frac{M_\infty^2 - 2}{M_\infty^2 - 1} \right) \frac{1}{V_\infty} \frac{\partial w}{\partial t} \right\} \\ &= - \left( \lambda \frac{D_{110}}{a^3} \cos\phi \frac{\partial w}{\partial x} + \lambda \frac{D_{110}}{a^3} \cos\phi \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{g_a}{\omega_o} \frac{D_{110}}{a^4} \frac{\partial w}{\partial t} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서  $\omega_o = D_{110} / \rho a^4$  는 무차원화된 비교 진동수를 의미한다. 무차원화된 동압계수와 공력 감쇠계수는 다음과 같이 표현되어진다.

$$\lambda = \rho_\infty V_\infty^2 a^3 / \beta D_{110}, \quad g_a = \frac{\rho_a V_\infty (M_\infty^2 - 2)}{\rho h \omega_o \beta^3} \quad (7)$$

## 3. 지배 방정식

선트회로가 부착된 압전재료를 포함하는 패닐의 운동방정식이 해밀턴 원리로부터 유도된다.

$$\delta \Pi = \int_0^t \delta (T - U + W) dt = 0 \quad (8)$$

여기서

$$T = \frac{1}{2} \int_{V_s} \rho_s \dot{u}^T \dot{u} dV + \frac{1}{2} \int_{V_p} \rho_p \dot{u}^T \dot{u} dV \quad (9)$$

$$U = \frac{1}{2} \int_{V_s} \varepsilon^T \sigma_s dV + \frac{1}{2} \int_{V_p} \varepsilon^T \sigma_p dV + \frac{1}{2} \int_{V_p} D_3 E_3 dV \quad (10)$$

여기서  $U$  는 포텐셜 에너지로서 복합재료와 압전재료의 변형에너지 그리고 전기에너지의 합으로 구성되어진다.

가상일은 전기포텐셜과 공기력과 이루어지며 다음과 같다.

$$\delta W = (-L\dot{Q} - R\dot{Q})\delta Q + \int (p_a) \delta w dA \quad (11)$$

여기서,  $L, R, Q$  는 각각 인덕턴스, 저항, 그리고 전하량을 의미한다.

유한요소 정식화를 위해 4 절점 사각형 요소가 사용되어지며 각각의 절점에는 4 개의 굽힘 자유도( $w, w_x, w_y, w_{xy}$ ) 와 2 개의 면내 자유도( $u, v$ ) 가 존재하며, 면내 및 수직변위들을 보간하기 위해 Lagrange polynomial 과 Hermite polynomial 이 각각 사용되어졌다.

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} N_{mx} \\ N_{my} \end{Bmatrix} w_m^e = N_m w_m^e, \quad w = N_b w_b^e \quad (12)$$

전기적 변위  $D_3$  는 압전재료의 단위 면적당 발생하는 전하량으로서 두께방향으로는 일정하다고 가정한다.

$$D_3 = \frac{Q}{A_p} \quad (13)$$

그러면, 전기-기계적으로 연계된 시스템의 이산화된 유한요소 방정식이 유도되어진다.

$$\begin{aligned} & \mathbf{M}_b \ddot{\mathbf{W}}_b + \mathbf{G} \dot{\mathbf{W}}_b + \left[ \lambda \mathbf{A} + \mathbf{K}_b + \mathbf{K}_{\Delta T} + \mathbf{K}_{1_{bbq}}(Q) \right. \\ & \left. + \mathbf{K}_{1_{bbb}}(\mathbf{W}_b) + \mathbf{K}_{1_{bbm}}(\mathbf{W}_b) + \mathbf{K}_{2_b}(\mathbf{W}_b^2) \right] \mathbf{W}_b \\ & + \left[ \mathbf{K}_{bm} + \mathbf{K}_{1_{bm}}(\mathbf{W}_b) \right] \mathbf{W}_m \\ & = \mathbf{P}_{b\Delta T} + \mathbf{H}_{bq} \mathbf{Q} + \mathbf{H}_{1_{bq}}(\mathbf{W}_b) \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} & \mathbf{M}_m \ddot{\mathbf{W}}_m + \left[ \mathbf{K}_{mb} + \mathbf{K}_{1_{mb}} \right] \mathbf{W}_b + \mathbf{K}_m \mathbf{W}_m \\ & = \mathbf{P}_{m\Delta T} + \mathbf{H}_{mq} \mathbf{Q} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} & \mathbf{L} \ddot{\mathbf{Q}} + \mathbf{R} \dot{\mathbf{Q}} + \frac{1}{\mathbf{C}_p} \mathbf{Q} \\ & = \left[ \mathbf{H}_{bq}^T + \mathbf{H}_{1_{bq}}^T(\mathbf{W}_b) \right] \mathbf{W}_b + \mathbf{H}_{mq}^T \mathbf{W}_m \end{aligned} \quad (16)$$

방정식 (14) 와 (15) 는 패널의 굽힘 및 면내 평형 운동 방정식을 기술해주는 식으로서, 기계적 변위는 압전재료에 전하를 발생시키며, 이러한 전하는 구조물의 진동을 억제할 수 있는 압전 힘(piezoelectric force)을 유도한다. 식 (16)은 인덕턴스와 저항으로 이루어진 전기 회로를 나타내주는 식으로서 기계적 변위는 압전재료 양단에 전위차  $\mathbf{H}^T \mathbf{W}$  를 발생시키게 된다.

두 개의 독립적인 선트회로가 부착된 패널(Fig. 1)에 대하여 위의 방정식을 블록 행렬 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} \mathbf{M}_b & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{M}_m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{W}}_b \\ \dot{\mathbf{W}}_m \\ \dot{\mathbf{Q}}_1 \\ \dot{\mathbf{Q}}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{G} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{W}_b \\ \mathbf{W}_m \\ \mathbf{Q}_1 \\ \mathbf{Q}_2 \end{Bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} \lambda \mathbf{A} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_b & \mathbf{K}_{bm} & \mathbf{H}_{bq}^1 & \mathbf{H}_{bq}^2 \\ \mathbf{K}_{mb} & \mathbf{K}_m & \mathbf{H}_{mq}^1 & \mathbf{H}_{mq}^2 \\ \mathbf{H}_{bq}^1 & \mathbf{H}_{mq}^1 & 1/\mathbf{C}_{p,1}^s & 0 \\ \mathbf{H}_{bq}^2 & \mathbf{H}_{mq}^2 & 0 & 1/\mathbf{C}_{p,2}^s \end{bmatrix} + \\ & \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{\Delta T} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{1_{bbq}}(Q) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{1_{bbb}}(\mathbf{W}_b) + \mathbf{K}_{1_{bbm}}(\mathbf{W}_m) & \mathbf{K}_{1_{bm}}(\mathbf{W}_b) & \mathbf{H}_{1_{bq}}^1(\mathbf{W}_b) & \mathbf{H}_{1_{bq}}^2(\mathbf{W}_b) \\ \mathbf{K}_{1_{mb}}(\mathbf{W}_b) & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{H}_{1_{mq}}^1(\mathbf{W}_b) & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{H}_{1_{mq}}^2(\mathbf{W}_b) & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{2_b}(\mathbf{W}_b^2) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{W}_b \\ \mathbf{W}_m \\ \mathbf{Q}_1 \\ \mathbf{Q}_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{P}_{b\Delta T} \\ \mathbf{P}_{m\Delta T} \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (17)$$

혹은,

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{U}} + (\mathbf{K} + \mathbf{K}_{\Delta T} + \mathbf{K}_1 + \mathbf{K}_2) \mathbf{U} = \mathbf{P} \quad (18)$$

#### 4. 해석 방법 및 절차

##### 4.1 비선형 모달 방정식

시스템의 자유도를 줄이기 위해 모달 변화식을 이용한다.

$$\mathbf{U} = \sum_{r=1}^m \sum_{s=1}^n \eta_{rs}(t) \{\phi_{rs}\} \quad (19)$$

사각형 패널에 있어서는 공기 흐름 방향으로의 6 개 ( $m=6$ )의 저차 모드와 스펜방향으로의 첫번째 모드 ( $n=1$ ) 사용하면 비교적 정확한 플러터의 특성을 모사할 수 있다.

그러면 식 (19)는 다음과 같이 된다.

$$\mathbf{U} = \sum_{r=1}^m \eta_r(t) \{\phi_r\} = \Phi \boldsymbol{\eta} \quad (20)$$

식 (19) 와 (20) 식을 (18)식에 대입하면 다음과 같은 비선형 모달 방정식이 유도되어진다.

$$\tilde{\mathbf{M}} \ddot{\boldsymbol{\eta}} + \tilde{\mathbf{C}} \dot{\boldsymbol{\eta}} + (\tilde{\mathbf{K}} + \tilde{\mathbf{K}}_{\Delta T} + \tilde{\mathbf{K}}_1 + \tilde{\mathbf{K}}_{\eta}) \boldsymbol{\eta} = \tilde{\mathbf{P}} \quad (21)$$

##### 4.2 PZT 의 최적의 형상 및 위치

PZT 의 크기 및 개수가 주어졌을 때, 가장 큰 압전 힘 (piezoelectric force)을 낼 수 있도록 형상과 위치가 결정되어지며, 이 과정은 유전자 알고리즘을 통하여 수행되어진다. 압전 힘(piezoelectric force)  $\mathbf{H} \mathbf{Q}$  가 증가함에 따라, 시스템에 유도 되어지는 댐핑량은 증가하게 되며, 유도 전위차  $\mathbf{H}^T \mathbf{W}$  가 커지게 됨에 따라 회로내의 저항을 통해 발산되어지는 전기에너지의 양도 증가하게 된다. 압전재료의 위치에 대한 정보를 내포하고 있는 전기-기계적 연계상수인  $\mathbf{H}$  를 적절하게 디자인 해 주면 시스템의 댐핑이 효과적으로 증대 될 수 있다.

최적화 과정에서 사용되어지는 성능지수는 다음과 같다.

$$\text{maximize: } \left| \Phi_c^T \mathbf{H} \right| \quad (22)$$

여기서,  $\Phi_c^T \mathbf{H}$  는 단위 전하당 모달 압전 힘을 의미하며 하첨자  $c$  는 고려대상이 되고 있는 모드를 의미한다. 최적의 형상과 위치가 결정되어지고 나면, 최적의 인덕턴스값과 저항값이 결정되어야 하며 pole placement method.<sup>3</sup> 를 통해 이루어진다.

#### 5. 수치 해석

Newmark- $\beta$  방법을 사용하여 패널의  $x=0.75a$  와  $y=0.5b$

위치에서의 패널의 거동 특성을 살펴본다. 해석을 위해서 네변이 단순지지된  $[45^\circ/-45^\circ/90^\circ/0^\circ]$ , 으로 적층된  $0.3 \times 0.3 \times 0.001\text{m}$ 의 복합재료판이 사용되어졌고,  $0.0005\text{m}$ 의 PZT가 복합재료 평판의 한 측면에 부착되어졌다. 패널에 작용되어지는 온도변화는  $\Delta T = T_0 \sin(\pi x/a) \sin(\pi y/b)$ 과 같이 가정하였으며 공력 감소 계수  $\mu M_\infty$ 은 0.01로 가정하였다.

Fig. 2는 첫번째 플러터 모드(1,1)를 제어하기 위한 PZT의 형상이다. Fig. 3은 고정된 저항값( $R=3899\Omega$ )에서 인덕턴스를 바꿔가면서 진동수와 댐핑을 계산한 결과이다. 최대의 댐핑을 갖게 하는 최적의 인덕턴스값에서 진동수가 가장 크게 변화함을 알 수 있다. Fig. 4는 Fig. 3에서 구해진 최적의 인덕턴스값인 25H에서 저항값을 변화시켜 가면서 진동수와 댐핑을 계산한 결과이다. 낮은 저항값에서는 진동수가 단락상태로 수렴해가고, 저항값이 높아질수록 개방상태의 진동수로 수렴하는 것을 볼 수 있다. 또한 앞의 결과와 마찬가지로 최적의 저항 값에서 진동수의 변화가 가장 커짐을 알 수 있다. 이 그림으로부터 최적의 저항값이 2800  $\Omega$ 임이 구해진다.

Fig. 5는 열 하중이 없고 무차원화된 동압계수  $\lambda=290$  하에서 단락상태에서의 패널은 극한사이클의 거동을 함을 알 수 있다. 최적의 인덕턴스값(25H)와 최적의 저항값(2800 $\Omega$ )에서 이러한 극한 사이클 거동은 완전히 억제되어 짐을 Fig. 6으로부터 알 수 있다.

Fig. 7은  $\lambda=180$ 과 온도변화  $\Delta T/\Delta T_{cr}=1.6$ 에서 패널의 운동을 모사해 주고 있으며 선트회로에 의해서 진폭이 3분의 1로 줄어드는 것이 Fig. 8에서 보여 지고 있다.

Fig. 9는 두 개의 플러터 모드 억제를 위해 유전자 알고리즘을 사용하여 PZT의 형상과 위치를 결정 한 결과를 나타낸다. 진한 음영부분은 1차 모드 억제를 위한 PZT 위치이며, 희미한 음영부분은 2차 모드 억제를 위한 PZT 위치를 나타낸다. 유전자 알고리즘에서 한 세대의 인구수는 600으로 하였으며, 교배확률은 0.9 그리고 0.03의 변종확률을 사용하였다.

Fig. 10에서와 같이  $\lambda=360$ 에서 패널은 극한사이클 거동을 하며, Fig. 11은 이러한 극한사이클 거동은  $L_1=40\text{H}$ ,  $L_2=7.3\text{H}$ ,  $R_1=6618\Omega$ ,  $R_2=3094\Omega$ 을 갖는 두 개의 독립된 선트회로에 의해 완전히 억제됨을 보여준다. Fig. 12와 Fig. 13은 열하중을 받고 있는 패널의 혼돈거동이 억제되는 모습을 보여주고 있다.

## 6. 결론

한 개와 두 개의 독립된 L-R 선트회로를 사용하여 비선형 패널 플러터를 수동적으로 억제시킬 수 있는 방법이 유한요소 정식화를 통해 제시되었다. 유전자 알고리즘을 사용하여 압전세라믹의 최적의 형상과 위치가 결정되어졌다. Newmark- $\beta$  방법을 사용하여 시간영역에서 복합재료 패널 플러터 억제에 대한 효과가 고찰되어졌다. 이 연구에 의하면 선트 회로를 이용한 수동 제어 기법은 플러터를 억제시키는 데 매우 효과적임을 알 수 있다. 능동제어보다는 그 성능은 떨어지지만, 본 수동 억제 기법에서는 전원장치 및 센서 시스템과 같은 부가적인 장비가 필요하지 않으며,

제어 법칙이 따로 필요하지 않고 시스템이 안정적(robust)이어서 패널 플러터 문제에 실제로 응용할 수 있는 장점을 가지고 있다.

## 후기

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실 사업에 의해 지원되었습니다.

## 참고문헌

1. Scott, R. C., and Weisshaar, T. A., "Controlling Panel Flutter Using Adaptive Materials," *Journal of aircraft*, Vol. 31, No. 1, 1994, pp 213-222.
2. Zhou, R. C., Lai, Z., Xue, D. Y., Huang, J.-K., and Mei, C., "Suppression of Nonlinear Panel Flutter with Piezoelectric actuators Using Finite Element," *AIAA Journal*, Vol. 33, No. 6, 1995, pp 1098-1105.
3. Hagood, N. W., and Flotow, A. V., "Damping of Structural Vibrations with Piezoelectric Materials and Passive Electrical Networks," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 146, No. 2, 1991, pp 243-268
4. Hollkamp, J. J., "Multimodal Passive Vibration Suppression with Piezoelectric Materials and Resonant Shunts," *Journal of intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 5, No. 1, 1994, pp 49-57
5. Tang, J., Wang, K.W., and Philen, M., "Sliding Mode Control of Structural Vibrations via Active-Passive Hybrid Piezoelectric Network," *Proceedings of SPIE Smart Structures and Materials Conference (Newport Beach, California)*, Vol. 3668, 1999, pp 543-553.
6. Hollkamp, J. J and Gorden, R. W., "An Experimental Comparison of Piezoelectric and Constrain-ed Layer Damping," *Proceedings of SPIE Smart Structures and Materials Conference*, Vol. 2445, 1995, pp 123-133.
7. Kim, S. J., Han, C. H., and Yun, C. Y. "Improvement of aeroelastic stability of hingeless helicopter rotor blade by passive piezoelectric damping," *Proceedings of SPIE Smart Structures and Materials Conference*, 1999, pp 1552-1561.
8. Goldberg, D. E., *Genetic Algorithms in Search, Optimization & Machine Learning*,

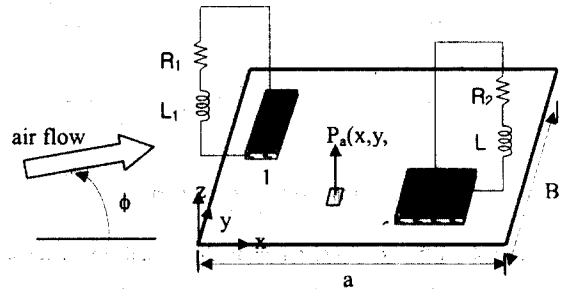


Fig. 1 Schematic diagram of a panel with two piezoelectric patches

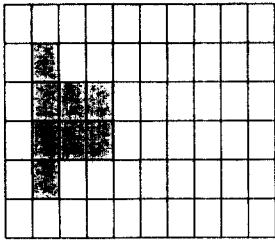


Fig. 2 The shape and the location of piezoceramic patches

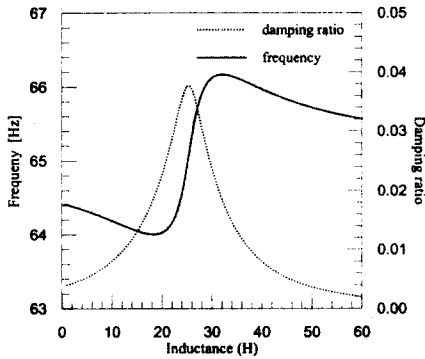


Fig. 3 Effects of inductance on the modal frequency and damping for first flutter mode (1,1) ( $R=3899\Omega$ )

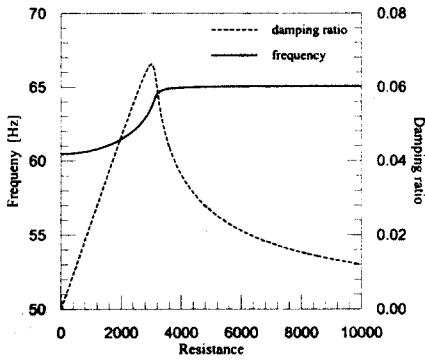


Fig. 4 Effects of resistance on the modal frequency and damping for first flutter mode (1,1) ( $L=25H$ )

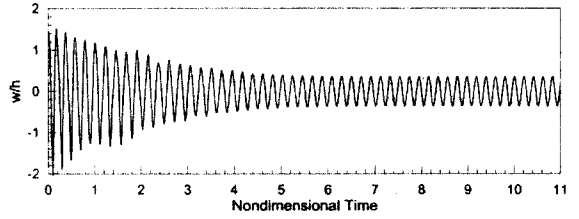


Fig. 5 Time history of panel motion at short circuit condition ( $\Delta T/\Delta T_{cr}=0, \lambda=290$ )

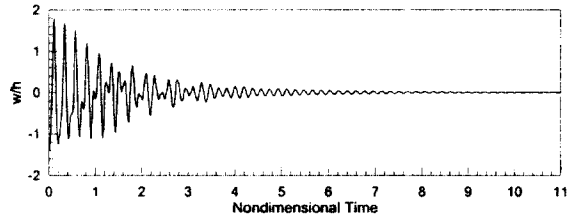


Fig. 6 Time history of panel motion with shunted circuit of  $L=25H, R=2.8K\Omega$  ( $\Delta T/\Delta T_{cr}=0, \lambda=290$ )

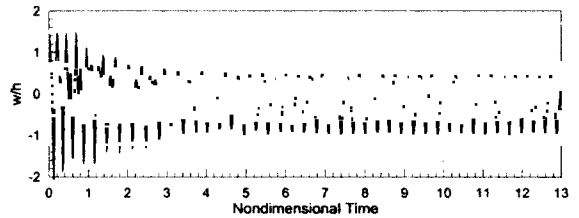


Fig. 7 Time history of panel motion at short circuit condition ( $\Delta T/\Delta T_{cr}=1.6, \lambda=180$ )

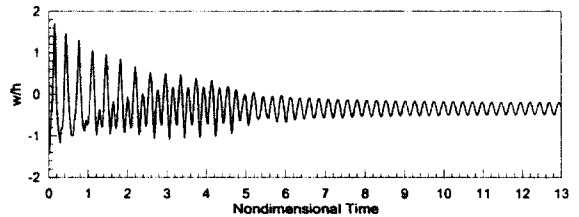


Fig. 8 Time history of panel motion with shunted circuit of  $L=25H, R=2.8K\Omega$  ( $\Delta T/\Delta T_{cr}=1.6, \lambda=180$ )

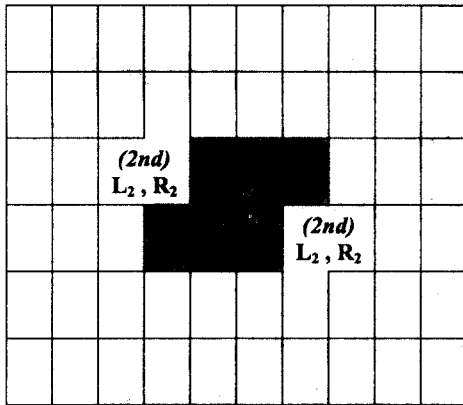


Fig. 9 Optimal shape and location of piezoceramic patches

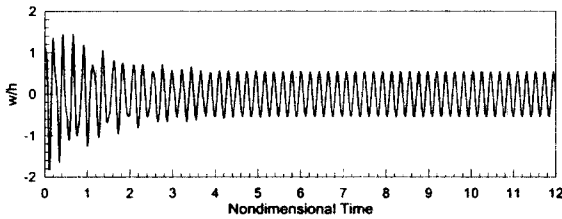


Fig. 10 Time history of panel motion at short circuit condition ( $\Delta T/\Delta T_{cr}=0$ ,  $\lambda=360$ )

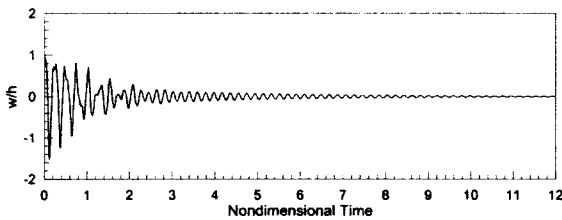


Fig. 11. Time history of panel motion with shunted circuits of  $L_1=28.6H$ ,  $L_2=4.9H$ ,  $L_1=40H$ ,  $L_2=7.3H$ ,  $R_1=6618\Omega$ ,  $R_2=3094\Omega$  ( $\Delta T/\Delta T_{cr}=0$ ,  $\lambda=360$ )

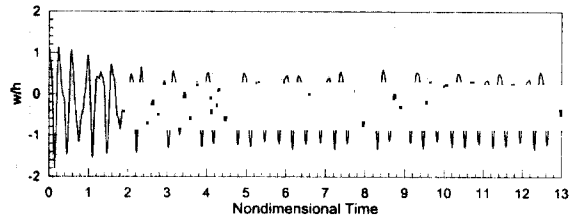


Fig. 12 Time history of panel motion at short circuit condition ( $\Delta T/\Delta T_{cr}=3$ ,  $\lambda=150$ )

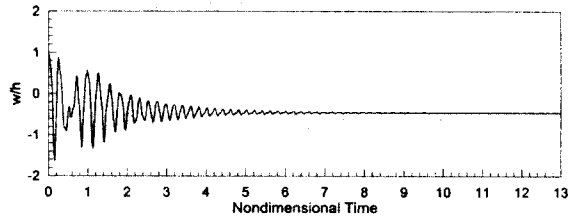


Fig. 13 Time history of panel motion with shunted circuits of  $L_1=40H$ ,  $L_2=7.3H$ ,  $R_1=6618\Omega$ ,  $R_2=3094\Omega$  ( $\Delta T/\Delta T_{cr}=3$ ,  $\lambda=150$ )