

論文

선트회로에 연결된 압전세라믹을 이용한
복합재료 패널 플러터의 능동 및 수동 제어

문성환* · 김승조*

**Active and Passive Suppression of Composite Panel Flutter
Using Piezoceramics with Shunt Circuits**

Seong Hwan Moon* and Seung Jo Kim*

ABSTRACT

In this paper, two methods to suppress flutter of the composite panel are examined. First, in the active control method, a controller based on the linear optimal control theory is designed and control input voltage is applied on the actuators and a PZT is used as actuator. Second, a new technique, passive suppression scheme, is suggested for suppression of the nonlinear panel flutter. In the passive suppression scheme, a shunt circuit which consists of inductor-resistor is used to increase damping of the system and as a result the flutter can be attenuated. A passive damping technology, which is believed to be more robust suppression system in practical operation, requires very little or no electrical power and additional apparatuses such as sensor system and controller are not needed. To achieve the great actuating force/damping effect, the optimal shape and location of the actuators are determined by using genetic algorithms. The governing equations are derived by using extended Hamilton's principle. They are based on the nonlinear von Karman strain-displacement relationship for the panel structure and quasi-steady first-order piston theory for the supersonic airflow. The discretized finite element equations are obtained by using 4-node conforming plate element. A modal reduction is performed to the finite element equations in order to suppress the panel flutter effectively and nonlinear-coupled modal equations are obtained. Numerical suppression results, which are based on the reduced nonlinear modal equations, are presented in time domain by using Newmark nonlinear time integration method.

초 록

본 논문에서는 복합재료 패널 플러터를 억제할 수 있는 두가지 방법에 대해서 연구하였다. 첫번째, 능동제어 방법에서는 선형 제어 이론을 바탕으로 제어기를 설계하였으며 제어입력이 작동기에 가해진다. 여기서 작동기로는 PZT를 사용하였다. 두번째, 인덕터와 저항으로 구성되어진 선트회로를 사용하여 시스템의 감쇠를 증가시킴으로써 패널 플러터를 억제할 수 있는 새로운 방법인 수동감쇠기법에 대한 연구가 수행되었다. 이 수동감쇠기법은 능동적 제어보다 강건(robust)하며 커다란 전원 공급이 필요하지 않고 제어기나 감지 시스템과 같이 복잡한 주변 기기가 필요

* 서울대학교 항공우주공학과

없이도 실제 패널 플러터 억제에 쉽게 응용할 수 있는 장점을 가지고 있다. 최대의 작동력/감쇠 효과를 얻기 위해서 유전자 알고리즘을 사용하여 압전 세라믹의 형상과 위치를 결정하였다. 해밀턴 원리를 사용해서 지배 방정식을 유도하였으며, 기하학적 대변형을 고려하기 위해 von-Karman의 비선형 변형률-변위 관계식을 사용하였으며 공기력 이론으로는 준 정상 피스톤 1차 이론을 사용하였다. 4절점 4각형 평판 요소를 이용하여 이산화된 유한 요소 방정식을 유도하였다. 효율적인 플러터 억제를 위해 패널 플러터에 중요한 영향을 미치는 플러터 모드를 이용한 모드축약기법을 사용하였으며, 이를 통해 비선형 연계 모달 방정식이 얻어지게 된다. 능동적 제어 방법과 수동 감쇠 기법에 의해 수행되어진 플러터 억제 결과들을 Newmark 비선형 시분할 적분법을 통해 시간 영역에서 살펴 보았다.

1. 서 론

패널 플러터(panel flutter)[1]는 패널의 한쪽 면으로 초음속 또는 극 초음속의 공기가 흐를 때 임계동압 이상에서 스스로 여기되어(self excited) 패널이 진동하는 공력탄성학적 불안정한 현상으로 정의되어지며, 패널의 진폭이 증가함에 따라 패널의 구조적 비선형 효과가 증가하여 굽힘과 인장의 연성효과가 커지게 되어 그 결과 패널은 유한한 진폭을 가지며 진동을 하는 극한 사이클의 거동을 하게 되는 특징을 가지고 있다.

Xue et al [2]는 유한요소방법을 사용하여 동압과 열 하중을 동시에 받는 복합재료 패널의 비선형 거동(극한사이클, 주기, 혼돈 거동)에 대한 특성을 시간 영역에서 보여주었다.

지능구조물을 사용하여 이러한 패널 플러터를 억제시키기 위한 능동적 제어 기법에 대해서 많은 연구들이 수행되어져 왔다. Scott와 Weissarr[3]는 PZT와 형상기억합금을 사용하여 Ritz 방법을 토대로 능동 및 수동제어를 통한 선형 플러터 해석을 수행하였다. Zhou et al [4]는 유한요소방법을 토대로 열 하중을 고려한 비선형 패널 플러터의 능동 제어에 대한 해석을 수행하였다.

Hagood와 Von Flotow[5]는 선트회로가 부착된 압전재료에 대하여 기계적 전기적 특성을 기술하는 방정식을 유도하였다. Hollkamp[6]는 보 모델에 대하여 다중의 인덕터와 저항이 병렬로 연결된 선트회로가 부착된 단 한 개의 압전재료를 가지고 다중의 모드를 제어 할 수 있음을 보여 주었다. Tang[7]은 보 모델에 대하여 능동 및 수동 제어를 동시에 사용함으로써 진동을 제어 할 수 있음을 보여주었다. Kim[8] 등은 인덕터와 저항으로 이루어진 선트회로를 사용하여 헬리콥터의 힌지없는 로우터 블레이드의 래그모드에 대한 진동을 억제할 수 있음을 실험을 통해 보여 주었다.

본 논문에서는 초음속 유동장에서의 동압과 공력하

중으로 인한 열 하중을 받고 있는 복합재료 패널의 비선형 플러터를 억제할 수 있는 방법으로서 제어 입력 전압을 작동기에 가해 플러터를 제어하는 능동 제어 기법과 저항 및 인덕턴스로 이루어진 선트회로(shunt circuit)가 부착된 압전 재료를 이용하여 외부 전원의 공급 없이 시스템의 감쇠를 효과적으로 증대 시켜 플러터를 억제하는 수동적 감쇠 기법(passive damping scheme)에 대한 연구가 수행되었다. 능동적 제어 기법에서는 구조물의 진동제어에 많이 사용되는 최적 제어 기법 중의 하나인 선형 2차 제어기(LQR: Linear Quadratic Regulator) 기법을 토대로 제어기(controller)를 설계하였다.

능동 제어 및 수동 감쇠 기법에서 유전자 알고리즘을 사용하여 최대의 작동력 및 감쇠 비를 낼 수 있는 압전 재료의 최적 형상과 위치를 결정하였으며 압전 재료로는 PZT(Lead zirconate titanate)가 사용되었다.

수동 감쇠 기법에서는 압전 재료의 형상과 위치가 결정되어지면 구조물의 감쇠 비(damping ratio)를 최대로 해주는 최적의 인덕턴스와 저항 값이 고유치 지정 기법(pole placement method)[5]을 통해서 결정되어 진다. 해밀턴 원리를 사용해서 전기-기계적으로 연계된 압전 재료가 부착된 복합재료 평판에 대한 지배 방정식을 유도하였다. 고전 적층판 이론(CLPT)과 온도하와 공기력의 조합으로 변위가 커지는 것과 큰 진폭의 극한 사이클 진동 (limit cycle oscillation)을 고려하기 위해 von Karman의 비선형 변위-변형률 관계식을 사용하였다. 공기력 이론으로는 준 정상 피스톤 1차 이론을 사용하였다.

이산화된(descretized) 유한 요소 운동 방정식을 유도하기 위해 4절점 사각형 요소를 사용하였다. 각각의 절점에는 4개의 굽힘 자유도(w, w_x, w_y, w_{xy})와 2개의 면내 자유도(u, v)가 존재하며, 면내(membrane) 및 수직 변위(transverse displacement)들을 보간하기위해 Lagrange 선형 보간 함수와 Hermite 보간 함수를 각

각 사용하였다. 시스템의 자유도를 줄이기 위해 6개의 플러터 모드를 이용한 모드축약기법을 사용하였으며, 이를 통해 비선형 연계 모달 방정식(nonlinear coupled modal equation)이 얻어지게 된다. Newmark 비선형 시분할 적분방법을 통해 여러 가지의 온도와 동압의 조건아래서 능동적 제어 결과 및 수동 감쇠 기법에 의해 억제된 결과들을 시간 영역에서 살펴 보았다.

2. 구성방정식

압전재료의 기계적/전기적 연계 특성을 기술해 주는 구성방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

능동제어

$$\begin{aligned}\sigma &= c^E \varepsilon - e E \\ D &= e^T \varepsilon + \epsilon^S E\end{aligned}\quad (1)$$

수동감쇠

$$\begin{aligned}\sigma &= c^D \varepsilon - h^T D \\ E &= -h \varepsilon + \beta^S D\end{aligned}\quad (2)$$

여기서 $\sigma, \varepsilon, c, D, E$ 는 각각 응력, 변형률, 탄성계수, 전기변위, 전기장을 의미하며 위 첨자 E, D, S 는 각각 일정한 전기장(단락회로), 전기변위(개방회로), 변형률을 의미한다.

평면응력 상태에 놓여있고 두께방향(3-방향)으로 분극처리된 압전재료에 대해서 압전상수 e 와 h 는 각각 압전상수 d 와 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$e = c^E d = \frac{E^E}{1-\nu} \begin{Bmatrix} d_{31} \\ d_{31} \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{aligned}h &= [c^D \beta^T d]^T = \frac{E^D}{\epsilon_{33}^T (1-\nu)} [d_{31} \ d_{31} \ 0] \\ &= [h_{31} \ h_{31} \ 0]\end{aligned}\quad (4)$$

여기서 ϵ_{33}^T 는 일정한 응력 상태에서 압전재료의 유전상수(dielectric constant)를 의미한다.

β 는 impermittivity constants로서 평면응력 상태를

가정하고, 두께방향(3-방향)으로 분극화된압전 재료에 대해서 유전상수 ϵ_{33} 과 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\beta^S = \frac{1}{\epsilon_{33}^S} \quad (5)$$

그러면, 열팽창 계수 α_p 를 갖고 온도 하중 $\Delta T(x, y, z)$ 를 받고 있는 압전 세라믹 대해서 식 (1)과 (2)는 다음과 같이 표현되어 질 수 있다.

능동제어

$$\begin{aligned}\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} &= \begin{Bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{Bmatrix}^E \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_{xy} \end{Bmatrix} - \Delta T \begin{Bmatrix} \alpha \\ \alpha \\ 0 \end{Bmatrix} - E_3 \begin{Bmatrix} d_{31} \\ d_{31} \\ 0 \end{Bmatrix} \\ &= \bar{Q}_p^E (\varepsilon - \Delta T \alpha_p - E_3 d)\end{aligned}\quad (6)$$

수동감쇠

$$\begin{aligned}\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} &= \begin{Bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{Bmatrix}^D \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_{xy} \end{Bmatrix} - \Delta T \begin{Bmatrix} \alpha \\ \alpha \\ 0 \end{Bmatrix} - D_3 \begin{Bmatrix} h_{31} \\ h_{31} \\ 0 \end{Bmatrix} \\ &= \bar{Q}_p^D (\varepsilon - \Delta T \alpha_p - D_3 h^T)\end{aligned}\quad (7)$$

$$E_3 = \frac{1}{\epsilon_{33}^S} D_3 - [h_{31} \ h_{31} \ 0] \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_{xy} \end{Bmatrix}$$

여기서 \bar{Q} 는 변환 축약 강성도 행렬(transformed reduced stiffness matrix)을 의미하며 하첨자 p 는 압전재료를 의미한다.

진폭이 평판 두께 정도 크기로 제한된 극한 사이클 거동을 해석하기 위해서는 기하학적 비선형성을 고려해야 하며, 본 연구에서는 von Karman의 비선형 변위-변형률 관계식을 사용하였으며 다음과 같이 표현된다.

$$\varepsilon = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u_0}{\partial x} \\ \frac{\partial v_0}{\partial y} \\ \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} \end{Bmatrix} + \frac{1}{2} \begin{Bmatrix} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \\ \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \\ 2 \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} \end{Bmatrix} - z \begin{Bmatrix} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \\ 2 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \end{Bmatrix}$$

$$= \varepsilon_m + \varepsilon_0 + z k \quad (8)$$

3. 공기력 이론

마하수 1.7 이상 그리고 마하수 5 이하의 유동장에 놓여 있는 패널에 작용하는 공기력은 피스톤 1차 이론으로 적절하게 표현 할 수 있으며 다음과 같다[2].

$$P_a = -\frac{\rho_a V_\infty^2}{\sqrt{M_\infty^2 - 1}} \left\{ \frac{\partial w}{\partial x} + \left(\frac{M_\infty^2 - 2}{M_\infty^2 - 1} \right) \frac{1}{V_\infty} \frac{\partial w}{\partial t} \right\} \quad (9)$$

동압 매개변수와 무차원화된 동압 계수와 공력 감쇠 계수 그리고 비교진동수를 다음과 같이 정의한다.

$$\beta = \sqrt{M_\infty^2 - 1}, \lambda = \frac{\rho_a V_\infty^2 a^3}{\beta D_{110}}, g_a = \frac{\rho_a V_\infty (M_\infty^2 - 2)}{\beta^3 \rho h \omega_0}, \omega_0 = \sqrt{\frac{D_{110}}{\rho h a^4}} \quad (10)$$

그러면 패널에 작용하는 압력 표현식 (9)는 식 (10)에서 정의한 무차원 계수들을 사용하여 다음과 같이 표현되어진다.

$$P_a = -\left(\lambda \frac{D_{110}}{a^3} \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{g_a}{\omega_0} \frac{D_{110}}{a^4} \frac{\partial w}{\partial t} \right) \quad (11)$$

$M_\infty \gg 1$ 경우에, 식 (10)의 공력감쇠계수는 다음과 같이 근사할 수 있으며, 거의 대부분의 패널 플러터 연구에서는 이러한 근사식을 사용하여 연구를 수행하고 있다[2].

$$g_a \approx \sqrt{\lambda \frac{\mu}{M_\infty}} \quad (12)$$

4. 지배 방정식

선트회로가 부착된 압전재료를 포함하는 패널의 운동 방정식을 해밀턴 원리로부터 유도하였다.

$$\delta \Pi = \delta \int_{t_1}^{t_2} (T - U) dt + \int_{t_1}^{t_2} \delta W dt = 0 \quad (13)$$

여기서 T 는 시스템의 운동에너지를 나타내며, U 는 포텐셜 에너지로서 능동 제어 경우에는 변형도 에너지 (strain energy)로 구성되며 수동 감쇠 기법에서는 변형도 에너지와 전기 에너지의 합으로 구성된다.

능동제어

$$U = \frac{1}{2} \int_V \varepsilon^T \sigma dV \quad (14)$$

수동제어

$$U = \frac{1}{2} \int_V \varepsilon^T \sigma dV + \frac{1}{2} \int_V D_3 E_3 dV \quad (15)$$

공기력과 전기적인 포텐셜에 의한 가상 일은 다음과 같이 표현되어진다.

능동제어

$$\delta W = \int_A \delta w(p_a) dA \quad (16)$$

수동제어

$$\delta W = (-L\ddot{Q} - R\dot{Q})\delta Q + \int_A \delta w(p_a) dA \quad (17)$$

여기서 L, R 그리고 Q 는 각각 외부회로의 인덕턴스, 저항 그리고 전하량을 나타낸다.

식 (14)-(17)를 식 (13)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 약형(weak form)식을 얻을 수 있다.

능동제어

$$\int_V \rho \delta u^T \ddot{u} dV + \int_V \delta \varepsilon^T \bar{Q} \varepsilon dV - \int_V \delta \varepsilon^T \bar{Q} \alpha \Delta T dV - \int_V \delta \varepsilon^T E_3 \bar{Q} dV = \int_A \delta w(p_a) dA \quad (18)$$

수동제어

$$\int_V \rho \delta u^T \ddot{u} dV + \int_V \delta \varepsilon^T \bar{Q} \varepsilon dV - \int_V \delta \varepsilon^T \bar{Q} \alpha \Delta T dV - \int_V \delta \varepsilon^T D_3 h^T dV = \int_A \delta w(p_a) dA \quad (19)$$

$$L \delta Q \ddot{Q} + R \delta Q \dot{Q} - \int_V \delta D_3 \frac{1}{\varepsilon_{33}} D_3 dV - \int_V \delta D_3 h \varepsilon dV = 0$$

이산화된 유한요소 방정식을 얻기 위해 4절점 사각

형 요소를 사용하였으며 각각의 절점에는 4개의 굽힘 자유도(w, w_x, w_y, w_{xy})와 2개의 면내 자유도(u, v)가 존재하며, 면내 및 수직 변위들을 보간하기 위해 Lagrange 선형 보간 함수와 Hermite 다항식을 각각 사용하였다.

그리고 전기적 변위 D_3 는 의 단위 면적 당 전하량으로서 두께 방향으로의 일정하다고 가정하였다.

$$D_3 = \frac{Q}{A_p} \quad (20)$$

각 유한 요소에서 얻어진 행렬 및 벡터들을 조립하면 다음과 같은 전기-기계적으로 연계된 비선형 패널 플러터의 이산화 된 형태의 운동방정식이 얻어진다

능동제어

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} M_b & 0 \\ 0 & M_m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{W}_b \\ \ddot{W}_m \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} G & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{W}_b \\ \dot{W}_m \end{Bmatrix} + \left(\begin{bmatrix} \lambda A & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \right. \\ & + \begin{bmatrix} K_b & K_{bm} \\ K_{mb} & K_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{Ne} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{N\Delta T} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} K1_{bbb}(W_b) + K1_{bbm}(W_m) & K1_{bm}(W_b) \\ K1_{mb}(W_b) & 0 \end{bmatrix} \left. \right) \begin{Bmatrix} W_b \\ W_m \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_{b\Delta T} \\ P_{m\Delta T} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} P_{be} \\ P_{me} \end{Bmatrix} \quad (21) \end{aligned}$$

수동제어

$$\begin{aligned} & M_b \ddot{W}_b + G \dot{W}_b + [\lambda A + K_b + K_{N\Delta T} + K1_{bbq}(Q) \\ & + K1_{bbb}(W_b) + K1_{bbm}(W_b) + K2_b(W_b^2)] W_b \\ & + [K_{bm} + K1_{bm}(W_b)] W_m \\ & = P_{b\Delta T} + H_{bq} Q + H1_{bq}(W_b) Q \quad (22) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & M_m \ddot{W}_m + [K_{mb} + K1_{mb}] W_b + K_m W_m \\ & = P_{m\Delta T} + H_{mq} Q \quad (23) \end{aligned}$$

$$L \ddot{Q} + R \dot{Q} + \frac{1}{C_p} Q = [H1_{bq}^T + H1_{bq}^T(W_b)] W_b + H1_{mq}^T W_m \quad (24)$$

여기서 하 첨자 b 와 m 는 각각 굽힘과 면내 방향을 의미한다. M, G 그리고 K 는 각각 질량, 공기 감쇠 그리고 선형 강성 행렬을 의미하며, $K_{N\Delta T}$ 는 온도 하중에 의해 유도되어지는 기하학적 강성(geometric stiffness) 행렬을 나타낸다. $K1$ 과 $K2$ 는 1차 및 2차 비선형 강성 행렬을 의미한다. $P_{\Delta T}$ 는 온도하중 벡터를

의미한다. A 는 공기력 행렬로서 반 대칭(skew symmetric) 형태를 갖고, C_p 는 압전재료의 정전용량(capacitance)을 나타낸다. 방정식 (22)와 (23)은 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 유도함을 보여준다. 식 (24)는 인덕턴스와 저항으로 이루어진 전기 회로를 나타내주는 식으로서 기계적 변위는 압전재료 양단에 전위차 $H^T W$ 를 발생시키게 되는 것을 알 수 있다.

위에서 표현된 운동 방정식들은 다음과 같이 간단한 형태로 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} & M \ddot{U} + C \dot{U} + (\lambda A + K + K_{N\Delta T} + K_{Ne} + K1 + K2) U \\ & = P \quad (25) \end{aligned}$$

5. 해석 방법 및 절차

5.1 모드 축약과 비선형 모달 방정식

위의 패널의 지배방정식 (25)는 자유도가 너무 크다. 효율적인 진동 제어를 위해서 패널 플러터에 중요한 영향을 미치는 몇 개의 저차 진동 모드를 고려하는 모드 축약 기법을 사용한다.

$$U = \sum_{r=1}^m \sum_{s=1}^n \eta_{rs}(t) \{\phi_{rs}\} \quad (26)$$

사각형 패널에 있어서는 공기 흐름 방향으로의 6개($m=6$)의 저차 모드와 스펜방향으로의 첫번째 모드를($n=1$) 사용하면 비교적 정확한 플러터 특성을 모사할 수 있다[2].

그러면 식 (26)은 다음과 같이 된다.

$$U = \sum_{r=1}^6 \eta_r(t) \{\phi_r\} = \Phi \eta \quad (27)$$

식 (27)을 식 (25)에 대입하고, 질량에 대하여 정규화된 고유벡터($\tilde{M} = \Phi^T M \Phi = I$)를 사용하면 패널의 지배 방정식 (25)는 다음과 같은 비선형 모달 방정식으로 표현할 수 있다.

$$\eta_{,rr} + \tilde{C} \eta_{,r} + (\tilde{K} + \tilde{K}_\eta + \tilde{K}_{\eta\eta}) \eta = \tilde{P}_{\Delta T} \quad (28)$$

여기서 τ 는 무차원화된 시간으로서 $\tau = \omega_0 t$ 를 나타낸

다. 식 (28)의 시간영역에서의 해를 구하기 위해 Newmark 비선형 시분할 적분법을 사용하였다.

5.2 PZT의 최적 형상과 위치

공기력 및 열 하중이 가해지는 구조물의 제어를 위해서는 큰 작동력을 낼 수 있는 작동기가 필요하며 PZT는 이러한 조건을 만족시켜 준다. 이 때 압전 재료의 부착 위치 설계가 중요한 관심사가 된다. 본 연구에서는 압전 세라믹의 크기 및 개수의 한계가 주어질 때, 유전자 알고리즘을 이용하여 억제하려는 모드의 제어력을 최대화하도록 압전 세라믹의 위치를 최적화 하였다. 압전 세라믹 작동기에 의한 작동력은 구조물의 모델링에서 사용하고 있는 각 유한 요소에 부착되어 있는 압전 세라믹 조각의 *on*, *off*에 의하여 결정된다. 각 조각의 *on*, *off*를 결정하여 압전 작동기의 전체 분포 형상을 설계하게 된다. 이 때 *on*인 영역에는 압전 세라믹을 부착하고, *off*인 영역에는 압전 세라믹을 부착하지 않는다.

능동 제어시 작동기 설계를 위한 최적화 과정에서 사용한 성능지수(performance index)는 다음과 같다.

$$\text{Maximize : } \min(|\Phi_c^T F_{PZT}|) \quad (29)$$

$\Phi_c^T F_{PZT}$ 는 제어 모드에 대한 단위 전압 당 모달 작동력을 의미한다.

수동 감쇠 기법에서는 식 (22)와 식 (23)의 우변의 압전 연계력 (piezoelectric coupling force) $HQ(H_{bq}Q, H_{mq}Q, H1_{bq}Q)$ 가 증가함에 따라 압전 재료에 의해 유도되어지는 감쇠 성능은 증가한다. 또, 전기적인 관점에서는, 식 (24)의 우변의 유도 전위차 $H^T W(H_{bq}^T W_b, H_{mq}^T W_m, H1_{bq}^T W_b)$ 가 커지게 됨에 따라 회로내의 저항을 통해 발산되어지는 전기 에너지의 양

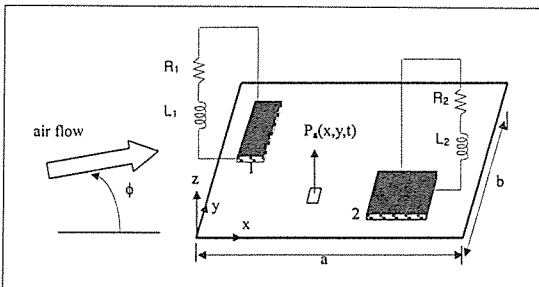


Fig. 1 Schematic diagram of a panel with two piezoelectric patches.

Table 7.1 Material properties of Graphite/Epoxy and PZT.

Property	Gr/Epoxy	PZT (PSI-5A-S4-ENH)
Elastic property		
$E_{11}(\text{GPa})$	155	66
$E_{22}(\text{GPa})$	8.07	66
$G_{12}(\text{GPa})$	4.55	25.38
ν_{12}	0.22	0.31
Coupling coefficient (k_{31})	0	0.32
Thermal expansion ($10^{-6}/^\circ\text{C}$)		
α_1	-0.07	3
α_2	30.1	3
Piezoelectric coefficient (10^{-12}m/V)		
d_{31}	0	-190
Electric permittivity		
$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$	0	1800
($\epsilon_0=8.85 \times 10^{-12}\text{farads/m}$)		
Maximum electric field (10^5V/m)	0	5.0
Mass density (kg/m^3)	1550	7800

도 증가하게 된다. 따라서 압전 재료가 전기-기계 연계 행렬(electromechanical coupling matrix)인 H 가 억제되어야 할 모드에 대한 압전 연계력을 크게 하는 위치에 부착된다면 댐퍼(damper)로서의 성능은 향상될 것이다.

독립적인 다중의 선트회로를 이용하는 수동 감쇠 기법의 최적화 과정에서는 선형의 전기-기계 연계 행렬을 사용하여 다음과 같이 성능지수를 설정하였다.

$$\text{Maximize : } \left| \Phi_c^T \begin{Bmatrix} H_{bq} \\ H_{mq} \end{Bmatrix} \right| \quad (30)$$

여기서 $\Phi_c^T \begin{Bmatrix} H_{bq} \\ H_{mq} \end{Bmatrix}$ 는 억제모드의 단위 전하 당 모달 압전 힘을 의미한다.

6. 수치 해석

Newmark 비선형 시간 적분법을 사용하여 패널의 최대 변위가 발생하는 $x=0.75a$ 와 $y=0.5b$ 위치[2]에서의 플러터 억제 결과를 시간영역에서 살펴보았다. 해석에는 네 번이 단순지지된 $[45/-45/90/0]_s$ 으로 적층

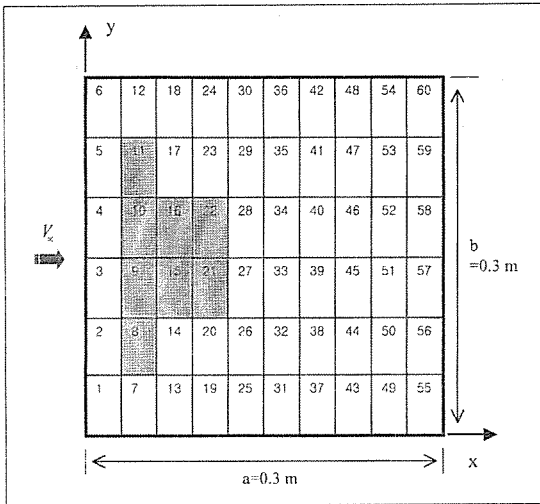


Fig. 2 The shape and the location of piezoceramic patch.

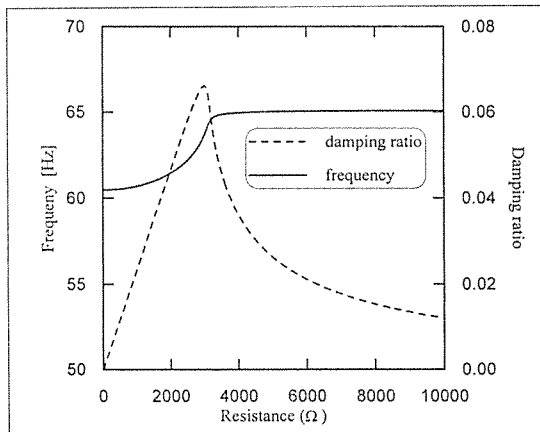


Fig. 3 Effects of resistance on the modal frequency and Damping for first flutter mode (1,1) (L=25H).

된 $0.3\text{m} \times 0.3\text{m} \times 0.001\text{m}$ 의 복합재료 평판을 사용하였으며, 0.0005m 의 PZT를 복합재료 평판의 한 쪽면에 부착하였다. 복합재료와 압전세라믹의 물성치들을 Table 1에 수록하였다. 패널에 작용하는 온도변화는 $\Delta T = T_0 \sin(\pi x/a) \sin(\pi y/b)$ 과 같이 가정하였으며 공력 감쇠 계수 $\mu/M_\infty = 0.01$ 로 가정하였다.

Fig. 2는 첫번째 플러터 모드(1,1)를 제어하기 위한 PZT의 형상이다. Fig. 3은 최적의 인덕턴스 값인 25H에서 저항 값을 변화시켜 가면서 진동수와 감쇠비를 계산한 결과이다. 낮은 저항 값에서는 진동수가 단락상태로 수렴해가고, 저항 값이 높아질수록 개방상

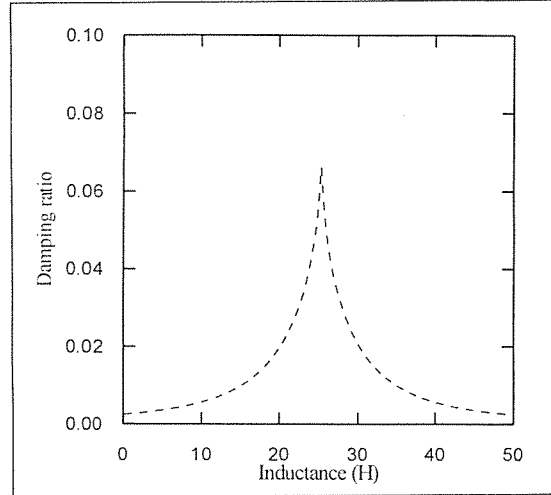
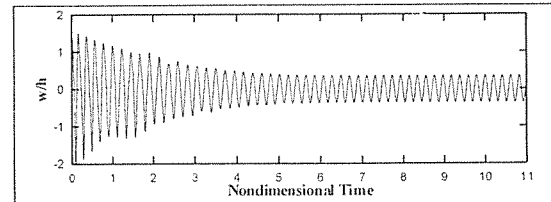


Fig. 4 Effects of inductance on the modal frequency and damping for first flutter mode (1,1) (R=2800Ω).

Fig. 5 Time history of panel motion at short circuit condition ($\lambda=290$).

태의 진동수로 수렴하는 것을 볼 수 있다. 또한 최적의 저항 값($R=2800\Omega$)에서 시스템의 감쇠비가 최대이며, 진동수의 변화가 가장 커짐을 알 수 있다. Fig. 4는 최적의 저항 값($R=2800\Omega$)에서 인덕턴스를 바꿔가면서 진동수와 감쇠비를 계산한 결과이다. 최적의 인덕턴스 값($L=25\text{H}$)에서 시스템의 감쇠비가 최대임을 알 수 있다.

Fig. 5로 부터 무차원화된 동압 $\lambda=290$ 에서 열 하중을 받지 않는 패널은 극한 사이클 거동을 함을 알 수 있다. Fig. 6은 능동 제어결과로서 패널 거동의 시간 기록과 제어 입력 전압을 나타낸 그림으로서 제어가 작동되면 극한 사이클 거동은 완전히 억제되는 것을 볼 수 있다. Fig. 7은 최적의 인덕터(25H)와 저항($2.8\text{K}\Omega$)으로 이루어진 선트회로에 의해 극한 사이클 진동이 완전히 억제되는 것을 보여 준다. 성능면에서는 능동제어가 수동제어보다 우수하다는 것을 볼 수 있다.

수동 감쇠 기법에서, 다중 모드를 동시에 제어하기

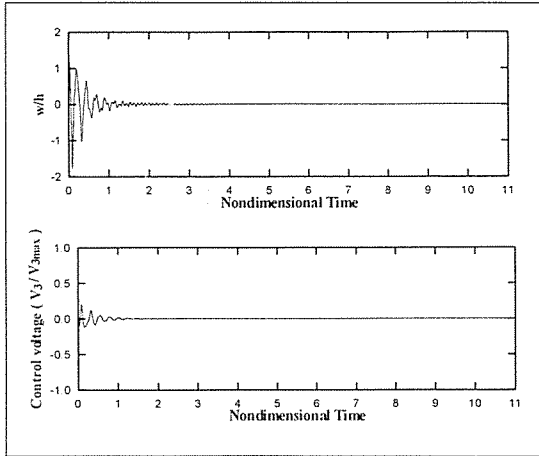


Fig. 6 Time history of panel motion and control input at active control ($\lambda=290$).

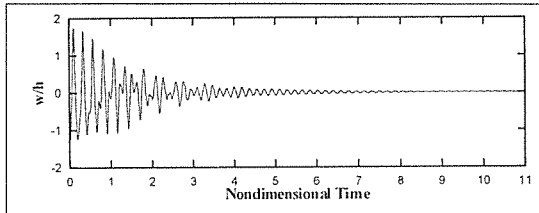


Fig. 7 Time history of panel motion with shunted circuit of $L=25H, R=2.8K\Omega$ ($\lambda=290$).

위해 서로 독립된 두 쌍의 압전 조각(piezoceramic patches)을 평판에 부착하였으며, 이 때 각각의 압전

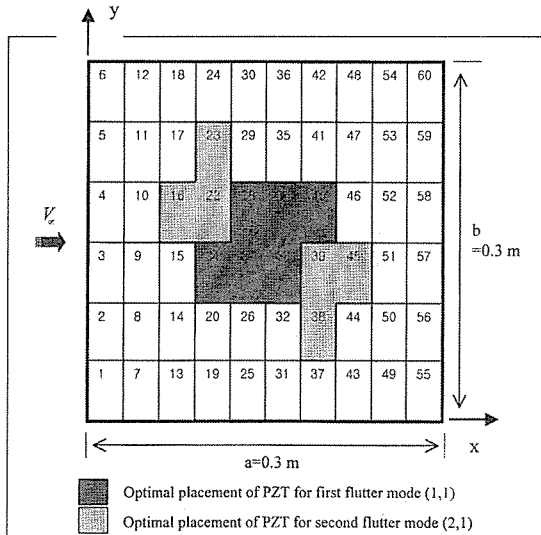


Fig. 8 Optimal shape and location of piezoceramic patches.

조각에는 인덕터와 저항이 연결되어 있다(Fig. 1). 높은 감쇠 효과를 얻기 위해 압전 조각의 최적의 형상과 위치를 결정해야 되는데 유전자 알고리즘 방법을 통해 이러한 최적화 과정을 수행하였다. 평판 전체를 60개의 유한 요소로 나누고 각 요소마다 압전 세라믹 작동기의 on 또는 off를 결정하였다. 압전 작동기의 설계변수는 60개로서 각 설계변수의 on과 off를 각각 1과 0으로 하여 설계변수를 60 bit의 이진수로 나타내었다. 본 연구에서는 한 세대의 개체 수를 600으로 하였고 교배와 변종의 확률은 각각 0.6과 0.03을 사용하였다. 최대 세대 진행은 1000회로 제한하였다. 1차와 2차 각각의 모드에 대해서 압전 조각이 평판 전체 면적의 1/10을 넘지 못하도록 제한 조건을 적용하였으며 그때의 최적 설계 결과는 Fig. 8과 같다. 진한 음영 부분이 1차 모드(1,1)를 위한 압전 세라믹 부착 위치이며 희미한 음영 부분은 2차 플러터 모드(2,1) 제어를 위해 압전 재료가 부착될 위치를 나타낸다.

Fig. 9는 무차원화된 동압 $\lambda=400$ 과 열 하중을 받지 않을 때, 패널은 ± 0.7 의 진폭을 갖는 극한 사이클 거

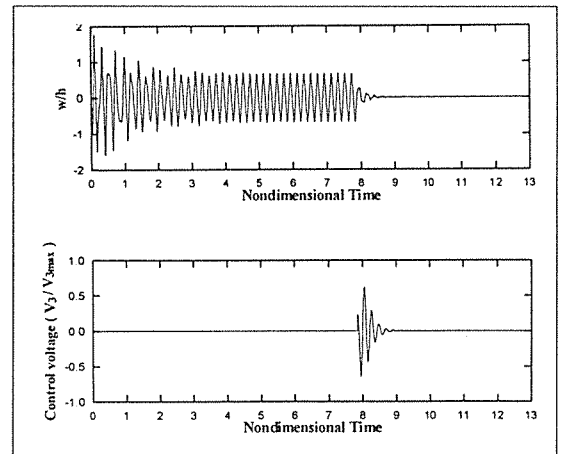


Fig. 9 Time history of panel motion and control input at active control ($\lambda=400$).

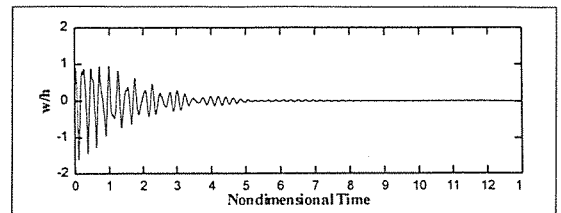


Fig. 10 Time history of panel motion with shunted circuits of $L_1=27.14H, L_2=4.84H, R_1=2323\Omega, R_2=1105\Omega$ ($\lambda=400$).

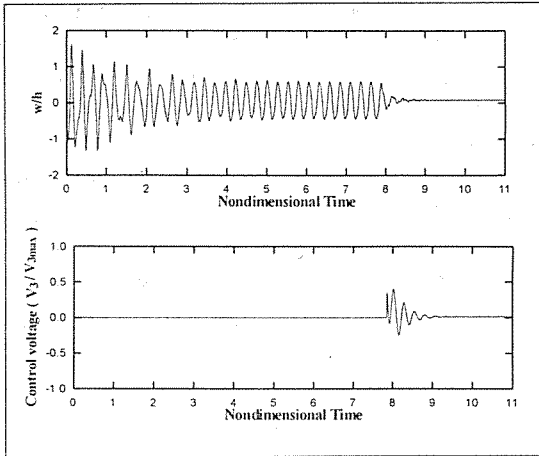


Fig. 11 Time history of panel motion and control input at active control ($\Delta T = 20\sin(\pi x/a)\sin(\pi y/b)$, $\lambda = 250$).

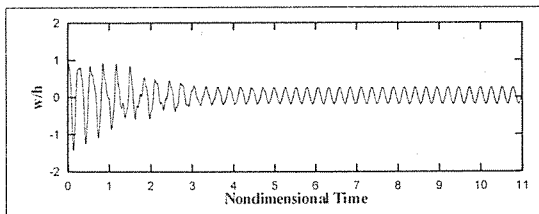


Fig. 12 Time history of panel motion with shunted circuits of $L_1 = 27.14H$, $L_2 = 4.84H$, $R_1 = 2323\Omega$, $R_2 = 1105\Omega$ ($\Delta T = 20\sin(\pi x/a)\sin(\pi y/b)$, $\lambda = 250$).

동을 함을 보여주고 있으며, 능동 제어에 의해 제어기가 작동되면 극한 사이클 거동은 완전히 억제되는 것을 볼 수 있다. Fig. 10은 최적의 인덕턴스 ($L_1 = 27.14H$, $L_2 = 4.84H$)와 저항 ($R_1 = 2323\Omega$, $R_2 = 1105\Omega$)으로 이루어진 선트회로에 의해 극한 사이클 진동이 완전히 억제되는 것을 보여 준다.

열 하중이 플러터 억제에 미치는 결과들이 보여진다. $\lambda = 250$ 과 $\Delta T = 20\sin(\pi x/a)\sin(\pi y/b)$ 에서 능동 제어결과와 제어 입력 전압이 Fig. 11에 나타나 있다. 제어를 하지 않은 단락회로(short circuit) 상태에서 패널은 극한 사이클 거동을 하며 이 거동은 제어 입력 전압이 가해지면서 완전히 억제 된다. 수동 감쇠 결과가 Fig. 12에 나타나 있다. 극한사이클은 열 하중으로 인해 완전히 억제 되지는 않고 그 진폭이 60% 정도 줄어드는 결과를 보여 준다.

7. 결 론

동압과 열 하중을 받고 있는 복합재료 패널의 비선형 플러터 거동을 제어 입력 전압을 작동기에 가해주면서 능동적으로 억제하는 방법과 인덕터-저항으로 구성되어진 선트회로를 사용하여 제어 입력 전압의 공급 없이도 플러터를 억제시킬 수 있는 수동 감쇠 기법이 유한요소 정식화를 통해 제시하였다. 플러터를 효과적으로 억제하기 위해 유전자 알고리즘을 사용하여 압전 힘(piezoelectric force)을 최대로 해주는 세라믹의 최적의 형상과 위치를 결정하였다. Newmark 비선형 시분할 적분법을 사용하여 시간영역에서 복합재료 패널 플러터 억제에 대한 효과가 고찰되어졌다. 이 연구에 의하면 능동 제어 결과가 수동 감쇠 기법을 사용한 결과보다 성능면에서는 뛰어난 것을 알 수 있다. 하지만, 수동 감쇠 기법은 능동 제어 방법과 비교해서 더 강건(robust)하며 제어기나 감지기와 같은 부가적인 장비가 필요 없고 특히 커다란 용량의 전원 공급이 없이도 억제가 가능하기 때문에 실제 패널 플러터 억제에 적용 가능하리라 판단된다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실 사업의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Bisplinghoff, R.L., Ashley, H., Principles of Aeroelasticity, John Wiley & Sons, Inc, New York, 1962, pp.416-449.
2. David Y. Xue., and Chuh Mei., "Finite Element Time Domain-Modal Formulation for Nonlinear Flutter of Composite Panels", AIAA Journal, Vol. 32, No. 10, January 1994, pp. 2044-2052.
3. Scott, R. C., and Weisshaar, T. A., "Controlling Panel Flutter Using Adaptive Materials", Journal of aircraft, Vol. 31, No. 1, 1994, pp. 213-222.

4. Zhou, R. C., LAI, Z., Xue, D. Y., Hauang, 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. Goldberg, D. E., Genetic Algorithms in Search, Optimization & Machine Learning., Addison-Wesley.