

〈논 문〉

압전 감지기/작동기를 이용한 복합재 평판의 최적 진동 제어 실험

Optimal Vibration Control Experiments of Composite Plates
Using Piezoelectric Sensor/Actuator

류근호* · 한재홍* · 이인**

Keun-Ho Rew, Jae-Hung Han and In Lee

(1996년 11월 27일 접수; 1997년 1월 6일 심사완료)

Key Words : Piezoelectrics(압전체), Composite plate(복합재 평판), Optimal control(최적 제어), Smart structures(지능 구조물), Spillover(잉여 현상)

ABSTRACT

The present paper describes the vibration control experiment of composite plates with bonded piezoelectric sensor and actuator. The system is modeled as two degree-of-freedom system using modal coordinates and the system parameters are obtained from vibratin tests. Kalman filter is adopted for extracting modal coordinates from sensor signal, and control algorithms applied to the system are Linear Quadratic Gaussian(LQG) control, Bang-Bang Control(BBC), Negative Velocity Feedback(NVF), Proportional-Derivative Control(PDC). From observation of the spillover and control performance, it is concluded that a higher order control algorithm such as LQG rather than BBC, NVF, PDC is suitable for efficient simultaneous control of both bending and twisting modes of composite plates.

1. 서 론

인류는 석기 시대 이후로부터 자신이 사용하는 도구의 성능을 꾸준히 발전시켜 왔다. 청동기 시대, 철기 시대를 거쳐서 현대는 나일론, 복합재료 등의 합성 물질 시대까지 이르렀으며, 다음 세대에는 스마트 재료시대로 발전되리라고 전망된다. 스마트 재료란 외부 환경의 변화를 감지하고 지능적으로 특정한 기능을 선택하고 수행할 수 있는 재료이다. 이러한 스마트 재료와 마이크로 프로세서 등의 지능 시스템을 이용하여 스스로 내부적인 안정성, 신뢰성을 추구하는 구조물이 스마트 구조물이다. 스마트 구조물은 자가 진단, 자가 치료, 자기 복제 및 소멸, 자율 학습 등의 기능들을 지녀야 하는데, 아직까지 이

개념에 충분히 부합되는 구조물은 만들어지지 못하였다⁽¹⁾. 스마트 구조물의 여러 특성 중 진동 제어는 기본적인 기능이며, 본 연구에서는 압전 재료를 이용한 복합재 평판의 진동 제어 문제에 대해 연구하였다.

구조물의 진동 제어를 수행하기 위해서는 스마트 구조물에 적합한 작동기 및 감지기를 선정하여야 한다. 압전 재료는 판형으로 가공될 수 있으며, 복합재 구조물에 삽입 또는 부착하기가 용이하고, 경량이며 높은 에너지 변환 효율을 갖으며 강한 힘을 낼 수 있는 장점 등으로 인하여 진동 제어에 많이 응용되고 있다.

기존의 연구를 살펴보면 다음과 같다. 한재홍과 이인⁽²⁾은 1차 횡전단 변형 판이론에 기초한 압전체 부착 구조물의 유한 요소 해석 프로그램을 개발하였다. Bailey와 Hubbard Jr.⁽³⁾는 보형 구조물에 압전 필름 작동기를 부착하여 진동 제어 실험을 수행하였다. 이들은 가속도계를 감지기로 이용하였으며 보의

*한국과학기술원 항공우주공학과

**정회원, 한국과학기술원 항공우주공학과

첫번째 굽힘 모드를 비례반속도 제어법 및 일정 반속도 제어법으로 제어하였다. Choi⁽⁴⁾는 압전 필름 감지기와 작동기를 사용하고, 다단계 뱅뱅 제어 기법을 제시하여 보의 진동 실험을 수행하였다. Collins 등⁽⁵⁾은 압전 필름의 모양을 가공하여 보 시편의 감지 신호를 공간 필터링하는 방법을 제안하였다. 김문현 등⁽⁶⁾은 복합재 평판에 상하 대칭으로 부착된 압전 세라믹 감지기, 작동기를 이용하여 복합 적층판의 능동 진동제어 실험을 수행하였고, 이창배 등⁽⁷⁾은 최적 제어 기법을 이용하여 복합재 보의 처음 두 모드를 제어하였다. Tzou와 Gadre⁽⁸⁾은 제어 이득을 변화시키면서 구조물의 진동을 제어하였다. Clark 등⁽⁹⁾은 압전 필름 모달 감지기를 이용하여 얇은 평판 구조의 제어 실험을 수행하였고, Baz 등⁽¹⁰⁾은 PPF(Positive Position Feedback)를 이용한 IMSC(Independent Modal Space Control) 제어 기법을 이용하여 구조물의 진동을 제어하였고, Choi 등⁽¹¹⁾은 강건 제어를 이용하여 복합재 매니플레이터의 진동을 제어하였다.

보다 일반적인 형태의 지능 구조물을 지향하기 위해서는 보와 같은 1차원 요소 보다는 평판이나 셸, 혹은 이들의 조합으로 이루어진 구조물을 제어할 필요가 있다. 그러므로 본 연구에서 구조물의 기본 요소인 보의 최적 진동제어 연구⁽⁷⁾에 이어서, 압전 세라믹을 작동기로, 압전 필름을 감지기로 이용하여 평판의 진동 제어 실험을 수행하고 그 특성을 고찰하고자 한다.

2. 운동 방정식 구성 및 제어기 설계

보나 평판과 같은 연속체는 무한대의 자유도를 지니고 있고 여러 모드를 갖는 특성으로 인하여 가제어성 및 가관측성의 문제 및 잉여 현상(spillover) 등의 문제들이 발생한다⁽¹²⁾. 특히 압전 감지기/작동기를 부착한 복합재 평판 구조물은 주파수 영역에서 여러 모드가 비교적 밀집되어 있고, 동적 거동을 해석적으로 정확히 예측하기가 어려우며 잉여 현상으로 인하여 효과적인 제어가 쉽지 않다.

2.1 운동 방정식 구성

본 연구에서 최적 제어기를 설계하기 위해서 복합재 평판을 2-자유도(굽힘 모드와 비틀림 모드)로 모형화하고, 첫째와 둘째의 모달 좌표 및 그 미분을 상태 변수로 선택하였다.

구조물의 일반적인 운동 방정식을 모달 좌표로 바

꾸어서 운동 방정식을 표현하면 각 모드별로 운동 방정식이 분리되는 이점을 살려 복합재 평판의 운동 방정식을 표현하면 다음과 같다.

$$\ddot{\eta}_i + 2\zeta_i \omega_i \dot{\eta}_i + \omega_i^2 \eta_i = b_i u, \quad i=1, 2 \quad (1)$$

여기서 ω_i 는 고유 진동수, ζ_i 는 모드 감쇠비, u 는 제어 전압이고, η_i 는 각 모드의 모달 좌표이고, b_i 는 모달 제어력 상수, $(\cdot)_i$ 는 첫번째 모드(굽힘 모드)와 두번째 모드(비틀림 모드)를 나타내는 색인이다. 상태 변수를 $x = [\eta_1 \quad \dot{\eta}_1 \quad \eta_2 \quad \dot{\eta}_2]^T$ 로 선택하면 아래와 같은 상태 공간 운동 방정식이 구성된다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \begin{bmatrix} A_1 & 0 \\ 0 & A_2 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} u \\ y &= [C_1 \quad C_2] x \end{aligned} \quad (2)$$

여기서

$$A_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_i^2 & -2\zeta_i \omega_i \end{bmatrix}, \quad b_i = \begin{bmatrix} 0 \\ b_i \end{bmatrix}, \quad C_i = [c_i \quad 0] \quad i=1, 2 \quad (3)$$

여기서 c_i 는 모달 감지 상수로서 b_i 와 마찬가지로 감지기/작동기의 전기적 상수와 모드 형태에 따라서 결정되는 상수이다⁽⁹⁾. 각 행렬 요소들은 진동 실험을 통하여 구했다. 위의 식 (2), (3)과 같이 운동 방정식을 구성하면 규명해야 될 시스템 파라미터(A , B , C 행렬 요소의 값들)의 수가 일반적인 좌표계로 표현한 운동 방정식의 파라미터의 수에 비해 줄어들므로 적은 노력으로 운동 방정식을 구성할 수 있다.

2.2 제어기의 설계

● 최적 제어(Linear Quadratic Gaussian, LQG)

본 연구에서 사용한 최적 제어는 LQG로서 칼만 필터(Kalman filter)를 통하여 상태 변수를 추정하고, LQR(Linear Quadratic Regulator)을 제어기로 사용하는 방식이다. 외부 및 내부 잡음을 고려한 시스템의 상태 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \begin{bmatrix} A_1 & 0 \\ 0 & A_2 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} v \\ y &= [C_1 \quad C_2] x + w \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 $F_i = [f_i \quad \omega_i f_i]^T$ 이고, v 는 과정 잡음(process noise)의 분산, w 는 측정 잡음(measurement noise)의 분산이고, F 는 과정 잡음이 각 상태 변수에 영향을 미치는 행렬이다.

시스템의 불확실성에 해당하는 과정 잡음과 측정 신호에 섞이는 측정 잡음을 백색 잡음으로 간주하

고, 이에 대해 최적으로 상태 변수를 추출해 내는 칼만 필터를 관측기로 사용하여 상태 변수 \hat{x} 를 추정하였다. w 는 감지기에서 오는 신호의 분산을 구하여 사용하고, f_i , v 는 시행 착오를 통하여 상태 변수를 잘 추정하는 파라미터로 결정하였다.

식 (5)와 같은 목적 함수 V 를 최소화하기 위해 대수 리카티(Algebraic Riccati) 방정식을 풀고, 그 방정식의 해로서 얻어지는 이득 값 G 를 칼만 필터에 의해서 추정된 상태 변수 \hat{x} 에 곱하여 식 (6)과 같이 제어 입력을 구한다.

$$V = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (5)$$

$$u = -G\hat{x} \quad (6)$$

여기서 Q 와 R 은 각각 상태 변수와 제어 입력에 대한 가중 행렬이며 각각 양의 반한정 대칭(positive semidefinite symmetric) 조건과 양의 한정 대칭 조건을 만족시킨다. Q , R 행렬 요소의 값을 변화시키면 그에 곱해지는 상태 변수나 제어 입력의 값을 최소화시키기 위한 이득이 구해진다⁽⁷⁾. 실제로 Q , R 을 정하는 방법은 3절 실험 방법에서 설명하였다.

최적 제어는 상태 되먹임 제어(state feedback control) 방식임에 비해서 고전 제어 방법은 주로 출력 값을 바탕으로 제어 입력을 결정하는 출력 되먹임 제어(output feedback control)를 사용한다. 고전 제어를 사용할 경우 제어 입력을 다음과 같이 계산한다.

● 반속도 제어

(Negative Velocity Feedback, NVF)

$$u = -K_v \cdot \left(\frac{dy}{dt} \right) \quad (7)$$

● 비례-미분 제어

(Proportional-Derivative Control, PDC)

$$u = -K_p \cdot \left(y + K_D \cdot \left(\frac{dy}{dt} \right) \right) \quad (8)$$

● 뱅뱅 제어(Bang-Bang Control, BBC)

$$u = -V_{max} \cdot \text{sgn} \left(\frac{dy}{dt} \right) \quad (9)$$

또한 뱅뱅 제어에 대해서는 채터링(chattering)을 줄이기 위해서 다음과 같이 암대(dead zone)를 설정한다.

$$-y_{dead} < dy/dt < y_{dead} \text{ 이면, } u=0 \quad (10)$$

이 때 y 는 감지기 신호, u 는 제어 입력 신호이다. 위와 같은 방법으로 최적 제어기, 반속도, 제어기, 비례-미분 제어기, 뱅뱅 제어기를 설계하였다.

3. 실험 방법

복합재 외팔 평판 시편의 규격 및 경계 조건은 Fig. 1과 같다. 시편은 (주) 한국화이버 탄소섬유/에폭시 프리프렉(Graphite/Epoxy prepreg)을 $[90_2/0]_s$ (이하 평판 2 혹은 Plate 2), $[60/-60/0]_s$ (이하 평판 3 혹은 Plate 3), $[90/0_2]_s$ (이하 평판 4 혹은 Plate 4) 각도로 적층한 다음 오토클레이브(auto-clave) 내에서 고온과 고압을 가해 성형하였다. 이것을 다이아몬드 절단기로 절단한 후, 에폭시 접착제를 이용하여 압전 세라믹(Fuji C-82)과 압전 필름(Pennewalt LDT2-028K)을 복합재 평판의 표면에 Fig. 1와 같이 접착하였다.

감지기와 작동기의 위치는 참고문헌 (2)에 소개된 프로그램을 이용하여 처음 두 모드에 대해 가제어성과 가관측성을 고려하여 선정하였다. 또한 보다 일반적인 구조물의 제어 환경에 가깝도록 감지기와 작동기를 각기 다른 위치에 부착시켰다. 시편에 따라 작동기의 위치는 조금 다르며 Fig. 1에 부착 위치를 표시하였다. 본 연구에서 사용한 복합재 프리프렉그와 압전 세라믹, 압전 필름의 물성값은 Table 1과 같다.

각 모드의 파라미터를 알기 위해서는 식 (3)에서 볼 수 있듯이 처음 두 모드의 고유 진동수의 모달 감쇠비를 측정하여야 한다. 고유 진동수는 FFT 분석기(FFT Analyzer, HP 35651A)를 이용한 주파수

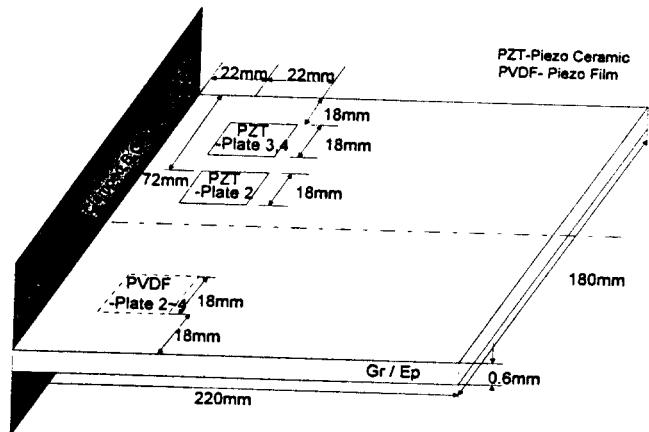


Fig. 1 A cantilevered composite plate with piezoelectric sensor/actuator.

Table 1 Material properties.

Properties		HFG Gr/Ep	Fuji C-82	Pennwalt LDT, 2-028K
E_1 (GPa)	영계수	130	59	—
E_2 (GPa)		10.0	59	—
G_{12} (GPa)	전단계수	4.85	22	—
G_{23} (GPa)		3.29	21	—
ν_{12}	포와송비	0.31	0.34	—
ρ (kg/m ³)	밀도	1480	7400	1780
d_{31} (pC/N)	압전변형률	—	-260	23
d_{32} (pC/N)		상수	—	-260
g_{31} ($\times 10^{-3}$ m ² /C)	압전응력	—	-8.7	216
g_{32} ($\times 10^{-3}$ m ² /C)		상수	—	-339

응답에서 피크 값의 주파수 값이고, 모달 감쇠비는 각 모드의 고유 진동수로 일정하게 가진한 후, 자유 감쇠시킨 포함선(envelope)을 지수 함수로 커브 피팅(curve fitting)하여 구하였다. 각 모드에 대해 5 회씩 실시하여 평균을 택하였다. 모달 제어력과 모달 감지 상수도 가진 실험을 통하여 구하였다.

복합재 평판의 전체 실험 장치의 구성은 Fig. 2와 같다. 먼저 컴퓨터에서 보낸 가진 신호에 의하여 시스템에 진동이 일어나면 압전체의 순방향 효과에 의해 압전 필름에서 전하가 발생하여 전하량 증폭기(Charge Amp., B & K Type 2635)를 통하여 증폭된다. 이렇게 증폭된 신호는 차폐 주파수(cut off frequency)가 300Hz인 저주파 필터(Low pass filter, Wavetek Dual HI/LO Filter model 852)를 통과하여 잉여 현상 및 앨리어징(aliasing)을 방지한 후에, 채집(sampling) 주파수가 1.0 kHz인 아날로그-디지털 변환기(Advantec PCL 818)를 통하여 디지털 신호로 변환된다. 이 신호는 제어기인 컴퓨터로 연결된다. 컴퓨터는 각 제어 이론에 따라 계산된 디지털 제어 신호를 출력한다. 이렇게 계산된 제어 신호는 다시 디지털-아날로그 변환기를 통하여 아날로그 신호로 바뀐다. 이때 디지털-아날로그 변환기에서 나가는 전압의 직류 성분(DC offset)을 제거하기 위해 상관기(Correlator, iSi Model 1015C)를 통과한다. 상관기를 통과한 신호는 이산화되어 있으므로 신호를 부드럽게 만들어 잉여 현상을 방지하기 위해 차폐 주파수가 3 kHz인 저주파 필터를 거친다. 이때 차폐 주파수가 높은 이유는 저주파 필터로 기인되는 위상 지연(phase delay)을 적게 하기 위함이다. 저주파 필터를 통한 신호는 높은 제어 전압을

만들기 위해 고전압 증폭기(Applied Electronics Lab.)를 통해 제어 전압을 30배 증폭한다. 이 전압이 복합재 평판에 부착된 압전 세라믹에 가해진 진동을 제어하게 된다. 이러한 제어 결과는 오실로스코프(HP 54601A) 및 FFT 분석기에 의하여 관찰, 분석된다.

주파수 영역에서의 제어 효과를 알아보기 위해서는 여러 가지 주파수 성분이 섞인 랜덤 교란 신호(random disturbance)를 자기 변환기(magnetic transducer, B&K MM0002)를 이용하여 구조물의 특정 부분에 가하였다. 이러한 교란에 대한 출력의 주파수 응답을 구하였다. 주파수 전달 함수는 FFT 분석기를 이용하여 측정하였고, 해닝 윈도우로 16번 평균하여 최종적인 주파수 응답을 구하였다.

상태 가중 행렬 Q 를 식 (11)과 같이 대각행렬로 정의하고, 제어 가중 행렬은 식 (12)와 같이 정의하여 상태 변수 및 제어 입력의 상대적 중요도를 변수 m 을 이용하여 조절하였다.

$$Q = \text{diag}[q_1 \ \omega_1 q_1 \ q_2 \ \omega_2 q_2] \quad (11)$$

$$R = 1/m \quad (12)$$

시스템이 안정한 범위에서 최대의 제어 성능을 발휘하도록 변수 q_1, q_2 를 조절하였다. $m=1.0$ 일 때 첫번째 고유 진동수로 가진하면서 안전성이 있고 제

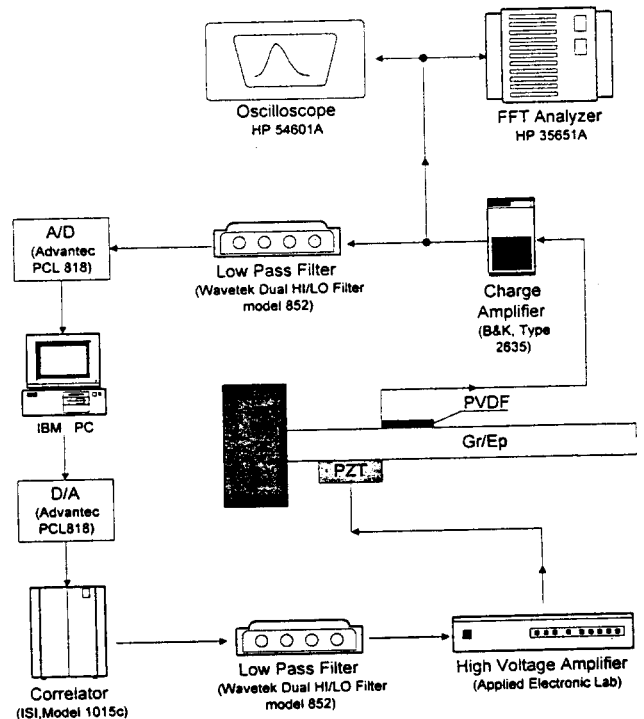


Fig. 2 Configuration of overall system.

어 효율이 가장 높은 q_1 을 찾고, 다시 두 번째 고유 진동수로 가진하면서 q_2 를 찾는 방식을 택하였다. 이때 q_1, q_2 는 시편에 따라 $q_1=2 \times 10^6 \sim 2 \times 10^8$, $q_2=3 \times 10^4 \sim 3 \times 10^6$ 의 값을 가진다. 최적 진동 제어 실험 수행시 설계 변수 m 을 0.05~1.0으로 변화시켜 가면서 관찰하였다.

4. 실험 결과

위와 같은 방식으로 최적 제어, 반속도 제어, 비례-미분 제어, 뱅뱅 제어에 대해서 실험을 수행하였을 때의 결과를 Table 2, 3에 소개하였다.

Table 2, 3에서 보듯이 반속도 제어, 뱅뱅 제어는 하나의 모드만 제어 가능하고, 비례-미분 제어 방식은 두 개의 모드를 동시에 제어하지만 제어 효과가 미미하였다. 그 이유는 이들은 두 개의 모드가 서로 다른 위상을 가질 경우에, 즉 서로 다른 i, j 에 대해서 $(b_i \cdot c_i) \cdot (b_j \cdot c_j) < 0$ 이면 차수가 낮은 제어기로 한 개의 모드를 제어해도 다른 모드에는 오히려 에너지가 증가해버려서 안전성이 나빠지기 때문이다.

Table 2와 3에서 보듯이 최적 제어는 두 개의 모드를 동시에 제어하고, 제어 성능도 뛰어났다. 최적 제어기 설계 시 세 번째 이상의 고차 모드는 제어기를 설계할 때 고려하지 않았으나 평판 3, 4에서는

Table 2 Peak value change of the first three mode of Plate 3 when various control algorithms applied.

Control Method	Δ Peak 1 [dB]	Δ Peak 2 [dB]	Δ Peak 3 [dB]
LQG	-13.97	-7.77	+1.49
NVF	-0.04	+1.60	+0.52
PDC	-0.50	-0.45	+1.89
BBC	+3.21	+2.07	-1.98

Table 3 Peak value change of the first fourth mode of Plate 4 when various control algorithms applied.

Control Method	Δ Peak 1 [dB]	Δ Peak 2 [dB]	Δ Peak 3 [dB]	Δ Peak 4 [dB]
LQG	-4.74	-2.72	-0.24	-0.007
NVF	+0.58	-0.42	+1.91	+0.50
BBC	-1.13	+1.14	+0.33	+0.55

Fig. 4~5에서 보듯이 진동이 약간 줄어든 경우도 있었다.

주파수 영역에서 평판 2, 3, 4에 대한 제어 결과는 아래 Fig. 3~5와 같다. Fig. 3~5는 백색 잡음(banded white noise)에 대해서 전달 함수를 주파수 영역에서 구한 것이다. 이때 해닝 윈도우를 사용하였고, 16회의 반복 평균을 이용하였다.

시간 영역에서 제어 결과는 평판 4에 대해서만 정리하였다. Fig. 6~8는 첫번째 모드로 3초간 가진한

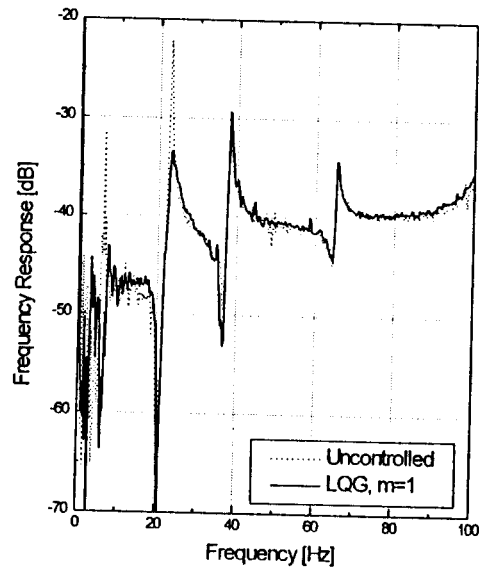


Fig. 3 Frequency response of LQG control/uncontrol output for Plate 2.

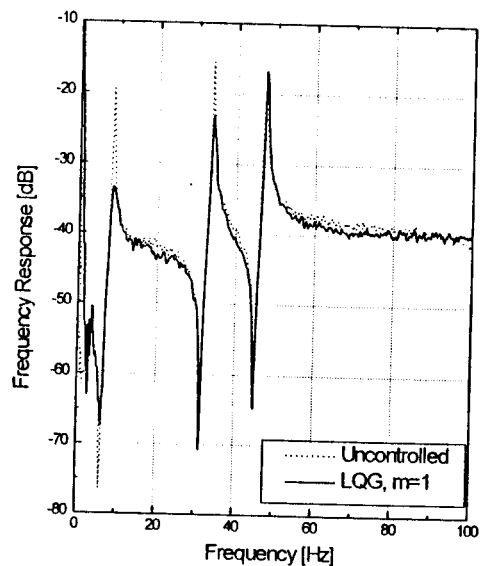


Fig. 4 Frequency response of LQG control/uncontrol output for Plate 3.

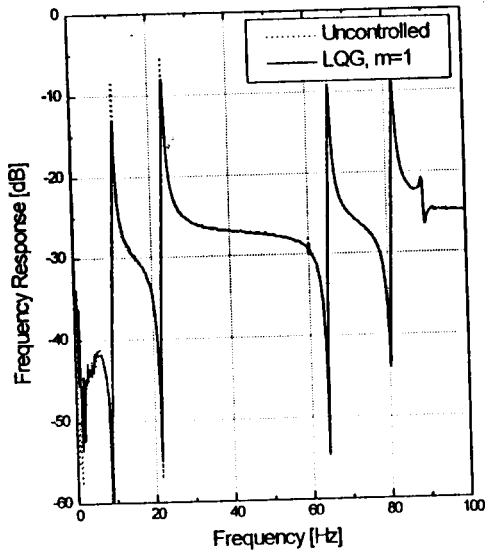


Fig. 5 Frequency response of LQG control/uncontrol output for Plate 4.

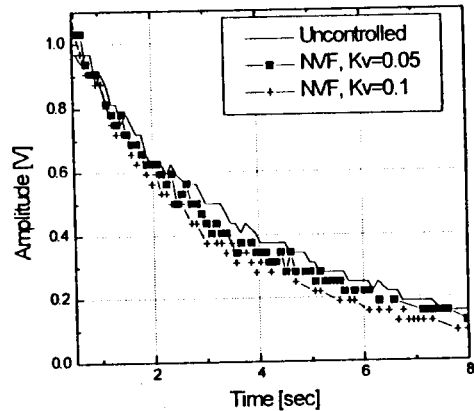


Fig. 8 Time response envelope of NVF control/uncontrol output of Plate 4 after 1st mode excitation.

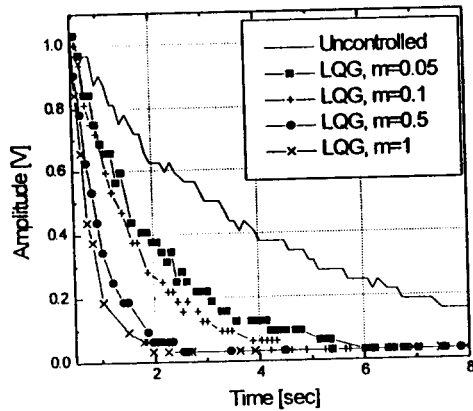


Fig. 6 Time response envelope of LQG control/uncontrol output of Plate 4 after 1st mode excitation.

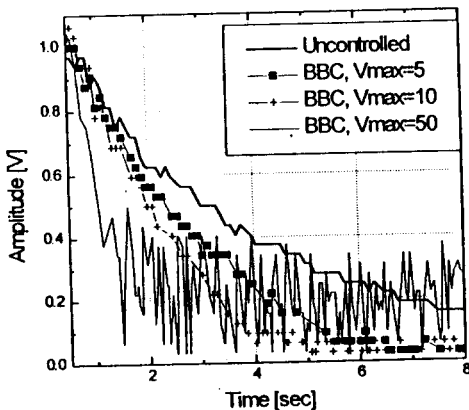


Fig. 7 Time response envelope of BBC control/uncontrol output of Plate 4 after 1st mode excitation.

하부터 제어를 수행한 결과이다. 제어 시작 직전의 평균 끝단의 최대 변위는 두께의 약 5배 정도이다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 최적 제어의 진동 제어 효과는 매우 뚜렷하였으나 반속도 제어, 뱅뱅 제어는 제어기의 이득을 키우면 고차 모드로 제어 입력이 유입되어 시스템이 불안정해지는 현상이 관찰되었다.

Fig. 9는 평판 4를 첫번째 모드의 고유 진동수로 3 초간 가진한 후에 반속도 제어를 실시한 결과이다. 이때 제어 이득은 $K_v=0.185$ 이다. Fig. 9는 x 축은 주파수, y 축은 시간, z 축은 파워 스펙트럼(power spectrum)을 선형적으로 나타낸 그림이며 각 파워 스펙트럼은 0.5초간의 출력 신호를 바탕으로 구하였다. Fig. 9를 보면 7번째 선에서 제어기를 작동시켰을 때 충격(impulse) 신호가 가해져서 모든 모드에 에너지가 조금씩 유입되었음을 알 수 있고, 첫번째(굽힘 모드), 세번째 모드의 피크는 천천히 감소하는 반면에 두번째(비틀림 모드) 모드와 일곱번째 모드의 피크값은 증가함을 알 수 있다. 특히 300 Hz 근처의 7번째 모드로 에너지가 다량으로 유입되었음을 알 수 있다.

이것이 앞서 언급한 잉여 현상이다. 잉여 현상은 여러 개의 모드가 밀집될수록 일어나기 쉽다. 평판 4의 제어 효과가 평판 2, 3에 비해서 떨어진 것도 같은 이유 때문이라 추정된다. 이 현상을 막기 위하여 저주파 필터를 사용하여 고주파 모드에서 오는 신호를 걸러내는 방법이나 감지기, 작동기를 여러 개 사용하여 특정 모드의 신호만 분리하여 측정 혹은 감지하는 방법 등이 있다.⁽¹²⁾

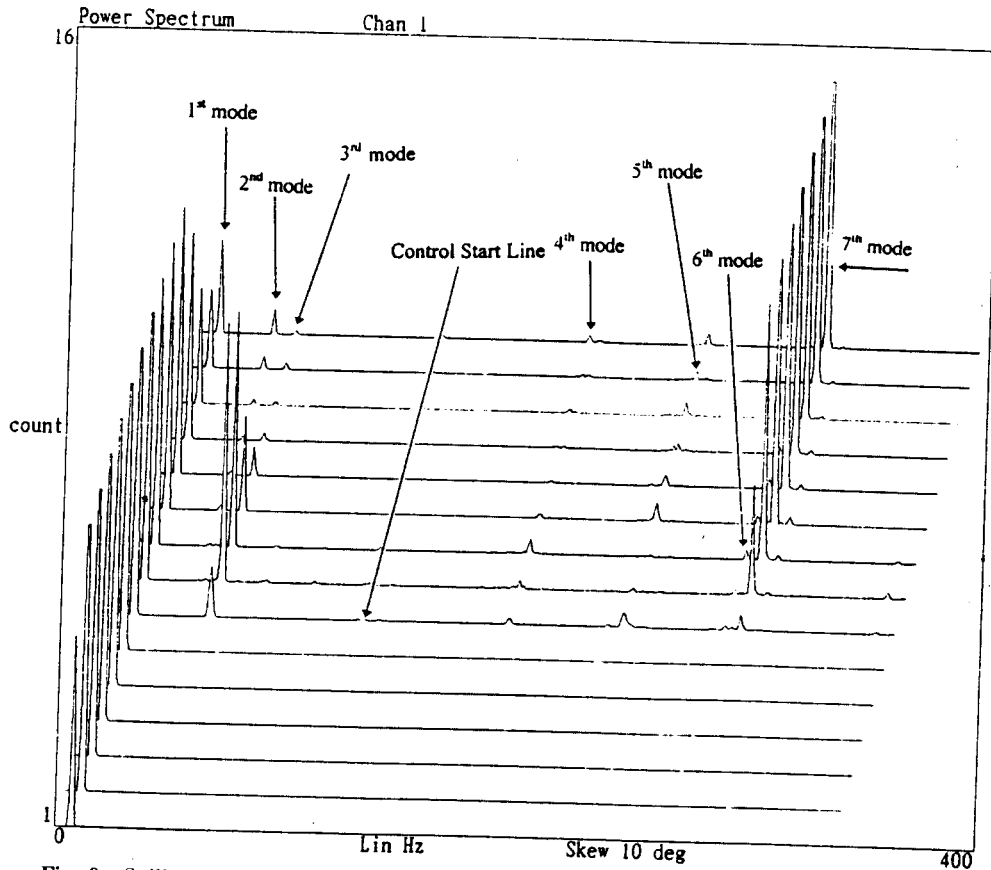


Fig. 9 Spillover into 7th mode when NVF method is applied after 1st mode excitation.

5. 결 론

최적 제어, 반속도 제어, 비례-미분 제어, 뱅뱅 제어를 이용하여 복합재 평판에 대해 진동 제어 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 본 연구에서는 압전 감지기/작동기를 부착한 복합재 평판의 처음 두 모드의 진동을 최적 제어를 사용하여 효과적으로 제어하였다.

(2) 반속도 제어, 비례-미분 제어, 뱅뱅 제어와 같은 낮은 차수의 제어기를 사용하여 평판과 같이 밀집된 고유 진동수를 가진 시스템의 진동을 제어할 때에 발생하는 잉여 현상을 관찰하였다.

(3) 잉여 현상을 초래하지 않는 안정된 상태에서 최적 제어가 낮은 차수의 제어기보다 좋은 제어 성능을 발휘하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단(KOSEF) 지원으로 수행

된 연구(과제 번호: 93-0700-02-01-3)의 일부이며
관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Gandhi, M.V., and Thompson, B.S., 1992, Smart Materials and Structures, Chapman & Hall Pub., London, pp. 36~40.
- (2) 한재홍, 이인, 1995, "유한요소법을 이용한 지능 복합재 구조의 진동 제어 특성 고찰," 한국항공우주학회지, 제23권, 제 1호, pp. 85~96.
- (3) Bailey, T., and Hubbard Jr., J.E., 1985, "Distributed Piezoelectric Polymer Active Vibration Control of a Cantilever Beam," Journal of Guidance, Vol. 8, No. 5, pp. 605~611.
- (4) Choi, S.B., 1995, "Alleviation of Chattering in Flexible Beam Control via Piezofilm Actuator and Sensor," AIAA Journal, Vol. 33, No. 3, pp. 564~567.
- (5) Collins, S.A, Miller, D.W., and von Flotow, A.H.,

1994, "Distributed Sensors as Spatial Filters in Active Structural Control," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 173, No. 4, pp. 471~501.

- (6) 김문현, 강영규, 박현철, 황운봉, 한경섭, 1995, "압전 감지기/작동기를 이용한 복합적층판의 능동진동제어," 대한기계학회 추계 학술발표회, pp. 558~562.
- (7) 이창배, 한재홍, 이인, 1996, "압전 감지기/작동기를 이용한 복합재 보의 최적 진동 제어 실험," 한국항공우주학회지, 제24권, 제 5 호, pp. 97~107.
- (8) Tzou, H.S., and Gadre, M., 1988, "Active Vibration Isolation by Polymeric Piezoelectric with Variable Feedback Gains," *AIAA Journal*, Vol. 26, No. 8, pp. 1014~1017.
- (9) Clark, R.L., Flemming, M.R., and Fuller, C.R., 1993, "Piezoelectric Actuators for Distributed

Vibration Excitation of Thin Plate: A Comparison Between Theory and Experiment," *Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 115, pp. 332~339.

- (10) Baz, A., Poh, S., and Fedor, J., 1992, "Independent Modal Space Control With Positive Position Feedback," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 114, pp. 96~103.
- (11) Choi, S.B, Cheong, C.C, Thompson, B.R., and Gandhi, M.V., 1993, "Vibration Control Robust to Parameter Variations in a Very Flexible Manipulator Fabricated From Composite Laminates," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 162, No. 2, pp. 195~208.
- (12) Meirovitch, L., 1990, *Dynamics and Control of Structures*, A Wiley-Interscience Pub., John Wiley & Sons, Ch. 8.