

압전 재료를 이용한 복합재 평판의 최적 진동제어

Optimal Vibration Control of Composite Plates by using Piezoelectric materials

한재홍*, 이창배, 류근호, 이 인 (한국과학기술원)

1. 서론

최근 들어 생명체와 마찬가지로 기계 구조물이 외부 환경 변화를 감지하고 이에 적절히 반응하도록 하여 구조물의 안정성 및 신뢰성을 확보하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다[1]. 이러한 구조물을 스마트(smart), 적응(adaptive) 및 지능(intelligent) 구조물이라 한다. 그러나 이 정의에 부합되는 구조물은 아직 만들어지지 못하고 있는 실정이다. 미래의 스마트 구조물은 다양한 기능성을 갖추어야 하는데 이중 능동 진동 제어 능력이 가장 우선적으로 고려될 기능이다. 구조물의 수명을 단축시키거나 오동작하게 만드는 대표적인 원인이 외부 교란에 의한 구조물의 진동 문제이기 때문이다. 특히 경량 복합재 항공기의 경우 플러터와 같은 동적 불안정성 현상이 발생하게 되고 이는 기체의 파손으로 이어질 수도 있다. 또한 대형 우주 구조물은 경량화로 인해 매우 유연한 성질을 갖게 되는데, 우주공간의 낮은 감쇠 상태에서 위성체의 자세 제어 시 발생하는 진동은 상당기간 지속되어 위성 안테나의 정밀 지향도를 현저히 떨어뜨리기도 한다.

이러한 진동 제어를 수행하기 위해서는 스마트 구조물에 적합한 작동기 및 감지기를 선정하여야 하는데, 압전 재료는 판형으로 가공될 수 있으며, 복합재 구조물에 삽입 또는 부착하기가 용이하며 경량인 장점으로 인해 진동제어에 대표적으로 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 첫번째 굽힘 모드를 비례 반속도 제어법 및 일정 반속도 제어법으로 제어하였다. Choi[4]는 압전필름 감지기와 작동기를 사용하고, 다단계 뱅뱅 제어 기법을 제시하여 보의 진동 실험을 수행하였다. Collins 등[5]은 압전 필름의 모양을 가공하여 보 시험편의 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]는 제어 이득을 변화시키면서 구조물의 진동을 제어하였다. Clark 등[9]은 얇은 평판 구조를 압전 필름 모달 감지기를 이용하여 제어 실험을 수행하였다.

본 연구에서는 복합재 스마트 구조물의 기본 요소인 보의 최적 진동제어 연구[7]에 이어서, 압전 소재를 감지기 및 작동기로 이용하여 평판의 최적 진동제어 실험을 수행하고 그 특성을 고찰하고자 한다.

2. 문제 정의 및 해결 방법

보나 평판과 같은 연속체 구조물은 무한대의 자유도를 지니고 있고 모드 특성으로 인해, 강제 어성 및 가관측성의 문제, 잉여 현상(Spillover)과 같은 문제점 들이 발생한다. 특히 복합재 평판 구조물은 해석적으로 동적 거동을 정확히 예측하기가 어렵고, 여러 모드의 고유 진동수가 비교적 밀집되어 있어 어려운 제어 문제를 형성한다.

본 연구에서는 상태변수 최적제어기를 설계하기 위해 첫째, 둘째 모드 좌표를 상태변수로 선택하고(복합재 평판을 2 자유도로 모형화), 시스템의 불확실성을 고려하며 잡음에 대해서 최적으로 강건한 칼만필터(Kalman filter) 관측기를 이용 상태변수를 추정하여 LQG (Linear Quadratic Gaussian) 제어기를 설계하였다.

모달 좌표로 표시된 구조물의 운동방정식은 다음과 같다.

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

$\mathbf{x} = [\eta_1 \dot{\eta}_1 \eta_2 \dot{\eta}_2]^t$ 로 상태변수를 선택하면, 아래와 같이 상태 공간 방정식이 구성된다.

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{Cx} + \mathbf{Du} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 A, B, C, D 행렬은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_i^2 & -2\zeta_i\omega_i \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ b_i \end{bmatrix}, \\ \mathbf{C} &= [c_i \quad 0], \quad \mathbf{D} = [0] \end{aligned} \quad (3)$$

다음과 같은 목적함수값 V를 최소화하기 위해 대수 리카티(Riccati) 방정식을 풀고, 그의 해인 이득값(G)을 칼만필터에 의해서 추정된 상태변수($\hat{\mathbf{x}}$)에 곱해서 제어 입력 u를 구한다.

$$V = E\left\{\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T (\mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} + \mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u}) dt\right\} \quad (4)$$

$$\mathbf{u} = -\mathbf{G}\hat{\mathbf{x}} \quad (5)$$

한편 고전 제어 기법을 사용할 경우 제어 입력은 다음과 같이 계산한다.

CGC (Derivative control):

$$u = -K_d \cdot \left(\frac{dy}{dt}\right) \quad (6)$$

PD 제어기:

$$u = -K_p \cdot \left\{y + K_D \cdot \left(\frac{dy}{dt}\right)\right\} \quad (7)$$

BBC:

$$u = -V_{\max} \cdot \text{sgn}\left(\frac{dy}{dt}\right) \quad (8)$$

채터링(chattering) 현상을 방지하기 위해서 다음과 같이 압대(dead zone)를 설치한다.

$$-y_{\text{dead}} < (dy/dt) < y_{\text{dead}} \text{ 이면, } u = 0 \quad (9)$$

3. 실험 방법

복합재 외팔평판 시편의 규격은 Fig.1과 같다. 시편은 프리프렉(Epoxy/Graphite prepreg)을 [60/-60/0]의 각도로 적층한 다음 오토클레이브내에서 고온과 고압을 가해 성형하였다. 이 시편을 다이아몬드 컷터를 이용하여 가공한 후 에폭시를 이용하여 압전세라믹(Fuji C-82)과 압전필름(Pennwalt사의 PFS LDT2-028K)을 복합재 평판의 표면에 Fig.1와 같이 각각 접착하였다. 감지기와 작동기의 위치는 참고문헌 [2]에 소개된 프로그램을 이용하여 처음 두 모드에 대해 가제어성과 가관측성을 고려하여 선정하였다. 보다 일반적인 구조물의 제어

상황을 구현하기 위해 감지기와 작동기를 동일 위치 시키는 Collocation 은 사용하지 않았다. 본 연구에서 사용한 복합재 프리프레그와 압전세라믹, 압전필름의 물성치는 Table 1과 같다.

시스템의 식별을 위해서는 식 (3)에서 알 수 있듯이 각 모드의 고유 진동수와 모달 감쇠비를 측정하여야 한다. 고유진동수는 자기 변환기에 가한 랜덤 신호와 이때 압전필름에서 나오는 출력신호의 주파수 응답 함수를 통해 실험적으로 구하였다 (Fig.3참조). 모달 감쇠비는 첫번째와 두번째 모드 별로 일정하게 가진시킨 후, 자유감쇠시킨 포함선(envelope)을 지수함수 형태로 커브피팅(curve fitting)하여 구하였다. 각 모드에 대해서 5회씩 실시하여 평균치를 택했다. 모달 제어력과 모달 감지 상수는 참고문헌[2]의 프로그램을 통하여 구한 뒤, 가진 실험을 통하여 보정하였다.

복합재 평판의 전체 실험장치의 구성은 Fig.2와 같다. 먼저 외부의 교란에 의하여 시스템에 진동이 일어나면 순방향 효과에 의해 압전필름에서 전하량이 발생하여 전하량 증폭기(Charge Amp., B&K Type 2635)를 통하여 증폭된다. 이렇게 증폭된 신호는 샘플링 주파수가 1kHz인 아날로그-디지털 변환기(Advantec PCL 818)를 통하여 디지털 신호로 변환된 후, 제어기인 컴퓨터로 연결된다. 컴퓨터는 여러가지 제어이론에 따라 계산된 디지털 제어신호를 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 통한다. 이 신호는 고차 모드의 진동수에 가해지는 제어 에너지를 제거하기 위해 컷오프 주파수(cut off frequency)가 100~300Hz인 저주파 통과 필터(low pass filter, Wavetech Dual HI/I.O Filter model 852)를 거친다. 저주파 통과 필터를 통한 신호는 높은 제어 전압을

만들기 위해 고전압 증폭기(Applied Electronics)를 통해 제어전압을 30배 증폭한다.(최대 출력 전압은 150V) 이 전압이 복합재 평판에 부착된 압전세라믹에 가해져 진동을 제어하게 된다. 이러한 제어 효과는 오실로스코프(HP 5460A)에 의하여 분석된다.

주파수 영역에서의 제어효과를 알아보기 위해서는 여러가지 주파수성분이 섞인 랜덤 교란 신호(random disturbance)를 자기 변환기(magnetic transducer, B&K MM0002)를 이용하여 구조물의 특정부분에 가하였다. 이러한 교란에 대한 출력의 주파수 전달 함수를 제어시와 비제어시에 각각 구하여 비교하였다. 주파수 전달 함수는 FFT 분석기(HP 36651A)를 이용하여 측정하였고, 해닝 윈도우로 16번 평균하여 데이터를 처리하였다.

4. 실험 결과 및 결론

대표적인 LQG 제어 결과는 Fig.3, 4와 같다. 처음 두 모드 동시 제어를 수행한 결과 10 dB, 8 dB 정도로 진폭이 줄었다. Fig. 4는 첫번째 모드로 3초간 가진한 후 제어를 수행한 결과이다. 매우 효율적이고, 안정적으로 진동이 제어됨을 알 수 있다. 세 번째 모드의 경우 제어기 설계 시 고려하지는 않았으나 진동이 3dB 정도 줄어들었다. 그러나, 저주파 통과 필터를 사용하지 않는 경우는 4번째 혹은 5번째 모드로 제어 에너지가 유입되어 매우 작은 제어 이득값에도 시스템이 불안정해지는 현상이 관찰되었다.

Table 2에는 여러 제어 기법들을 이용하여 복합평판의 진동을 제어하는 경우 대표적인 모달 피크치 값의 변화를 정리하였다. 고전 제어기법을 사용한 경우는 불안정성이 관찰되지 않는 범위 안에서 게인 조절을 시행하였다. 고전 제어 기법인 BBC, PD 및 CGC 제어기법은 Table 2에서 알 수 있듯이 처음 두 모드의 동시 제어가 거의 불가능

하였다. 그 이유는 이들 제어 기법은 출력 되먹임 기법을 사용하므로 처음 두 모드의 모달 감지, 제어 상수의 위상이 어긋나는 경우 불안정성을 보이기 때문이다. Fig. 5는 첫번째 모드로 가진하다가 CGC를 이용하여 제어하는 경우이다. 작은 제어 이득값에도 다른 고차 모드가 불안정해지는 결과를 보였다.

본 연구에서는 압전 감지기/작동기와 LQG 최적 제어 기법을 사용하여 복합재 평판 구조물의 처음 두 모드의 진동을 효율적으로 제어하였다. BBC, CGC 나 PD 제어 기법과 같은 고전 제어법은 두 모드 동시 제어에 매우 비효율적인 반면 상태 변수 추정에 의한 IQG 제어 방법은 효율적인 제어가 가능하였다.

[참고문헌]

1. Rogers, C.A., Barker, D.K., and Jaeger, C.A., "Introduction to Smart Materials and Structures," U.S. ARO Workshop on Smart Materials, Structures, and Mathematical Issues, VPI&SU, Virginia, Technomic Publishing Co., Sep., 1988.
2. 한재홍, 이인, "유한요소법을 이용한 지능 복합재 구조의 진동 제어 특성 고찰," 한국항공우주학회지, 제 23 권 제 1 호, 1995, pp. 85-96.
3. Bailey, T., and Hubbard Jr., J.E., "Distributed Piezoelectric Polymer Active Vibration Control of a Cantilever Beam," Journal of Guidance, Vol. 8, No. 5, pp. 605-611.
4. Choi, S.-B., "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., "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, "압전 감지기/작동기를 이용한 복합적층판의 능동 진동제어," 대한기계학회 추계 학술발표회, 1995, pp. 558-562.
7. 이창배, 한재홍, 이인, "압전재료를 이용한 복합재 보의 최적 진동 제어," 한국항공우주학회 추계학술발표회, 1995, pp. 132-136.
8. Tzou, H.S., and Gadre, M., "Active Vibration Isolation by Polymeric Piezoelectret with Variable Feedback Gains," AIAA Journal, Vol. 26, No. 8, pp. 1014-1017.
9. Clark, R.L., Flemming, M.R., and Fuller, C.R., "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.

Table 1. Material properties.

	HFG	Fuji	PFS
	Gr/Ep	C-82	LDT
			2-028K
E_1 (GPa)	130	59	—
E_2 (GPa)	10.0	59	—
G_{12} (Gpa)	4.85	22	—
G_{23} (Gpa)	3.29	21	—
ν_{12}	0.31	0.34	—
ρ (kg/m ³)	1480	7400	1780
d_{31} (pC/N)	—	-260	23
d_{32} (pC/N)	—	-260	33
g_{31} (x10 ⁻¹² m ² /C)	—	-8.7	216
g_{32} (x10 ⁻¹² m ² /C)	—	18.0	-339

Table 2. Peak value change of each modes.

Control Method	Δ peak 1 [dB]	Δ peak 2 [dB]	Δ peak 3 [dB]
LQG	-10.63	-8.09	-3.79
BBC	+3.21	+2.07	-1.98
PD	-0.50	-0.45	+1.89
CGC	-0.04	+1.60	+0.52

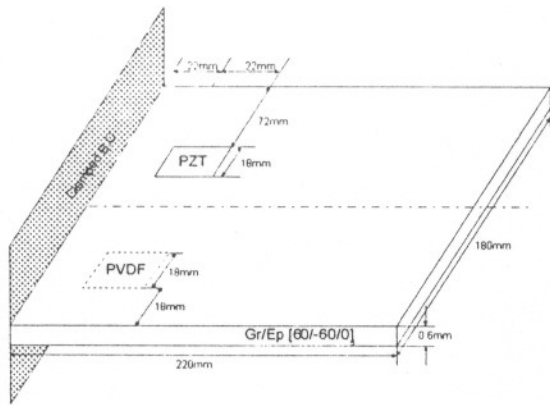


Fig.1 A cantilevered composite plate with piezoelectric sensor/actuator.

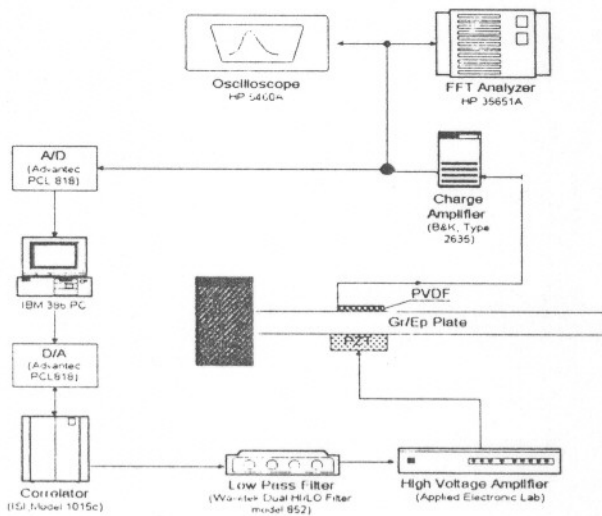


Fig. 2 Configuration of overall system.

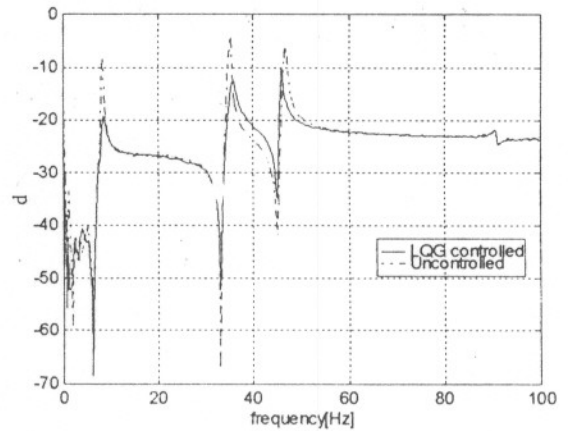


Fig. 3 Frequency response of LQG control.

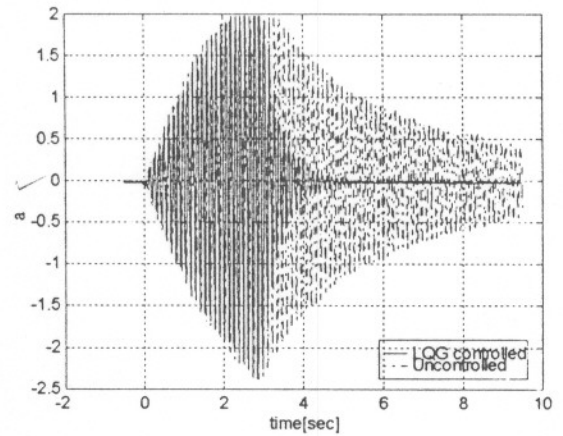


Fig. 4 Time response of LQG controlled system.

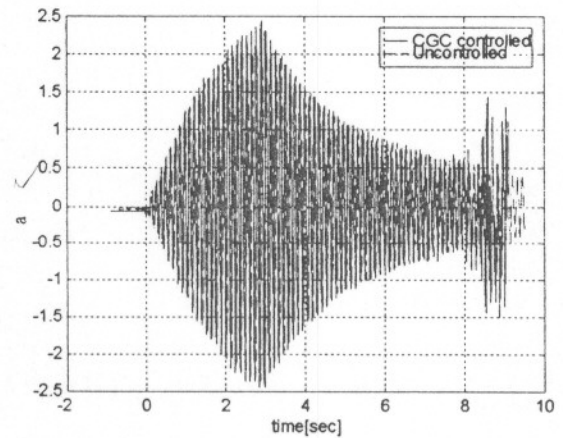


Fig. 5 Time response of CGC controlled system.

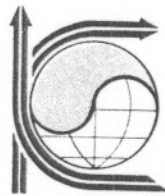
1996 年度

春季 學術發表會 論文集

Proceedings of the KSAS Spring Annual Meeting '96

日時：1996年 4月 27日(土)

場所：朝 鮮 大 學 校



主 催

社團 韓 國 航 空 宇 宙 學 會
法人 The Korean Society for Aeronautical & Space Sciences

後 援

韓 國 科 學 技 術 團 體 總 聯 合 會

제 3 발표장

좌장 : 이창진 (건국대학교)

- 슬러리 액적의 미소폭발현상에 관한 이론적 해석
.....조주형* (한국항공우주연구소), 백승욱 (한국과학기술원) ...125
- 초음속 램가속기의 초폭굉모드 초기 발진과정에 대한 과도 수치모사
.....최정열*, 정인석 (서울대학교) ...130
- 가스터빈 엔진의 실용적인 성능진단 해석 기법
.....추동호*, 홍용식 (인하대학교) ...134

좌장 : 백승욱 (한국과학기술원)

- 제트유동의 충들에 의한 Pulse 연소기의 연소특성 변화
.....이창진* (건국대학교), 정인석, 김성룡 (서울대학교) ...140
- 충돌 사류의 후류 유동에 관한 연구
.....박종욱*, 차영란, 김선진, 김 유 (충남대학교) ...145
- 충격파 혼합층대를 이용한 극초음속 항공기 엔진내의 연소현상
.....이상현*, 정인석 (서울대학교) ...151
- SWIRL 인젝터의 액막특성에 관한 연구
.....박병성* 김선진, 강경택, 김 유 (충남대학교) ...156

좌장 : 노명수 (인하공업전문대학)

- 액체로켓 엔진 연소실의 열 전달 해석
.....김경호*, 김영수, 우유철 (현대우주항공) ...162
- 원통형 로켓플룸 저부가열의 열복사 모델
.....김만영*, 백승욱 (한국과학기술원) ...168
- 화학반응 모델이 충격파 유도 연소 불안정 해석에 미치는 영향
.....최정열*, 정인석 (서울대학교) ...173
- 유동방향의 모호성을 제거하기 위한 2색 PIV연구
.....정경석*, 이재협 (한국기술교육대학교) ...177

제 4 발표장

좌장 : 조맹호 (인하대학교)

- 압전 재료를 이용한 복합재 평판의 최적 진동제어
.....한재홍*, 이창배, 류근호, 이 인 (한국과학기술원) ...183