

광섬유 센서와 압전 작동기를 이용한 평판의 최적 진동 제어

Optimal Vibration Control of a Plate Using Optical Fiber Sensor and Piezoelectric Actuator

김도형* · 한재흥** · 양승만* · 김대현* · 이인† · 김천곤*** · 홍창선***

Do-Hyung Kim, Jae-Hung Han, Seung-Man Yang, Dae-Hyun Kim, In Lee,
Chun-Gon Kim and Chang-Sun Hong

(2001년 12월 22일 접수 : 2002년 3월 20일 심사완료)

Key Words : Optical Fiber Sensor(광섬유 센서), Piezoelectric Actuator(압전 작동기), Vibration Control(진동제어)

ABSTRACT

Vibration control of a plate using an optical fiber sensor and a piezoelectric actuator is considered in the present study. An aluminum plate with attached Extrinsic Fabry-Perot Interferometer (EFPI) and piezoelectric actuator is prepared for experimental investigation. Vibration level of EFPI that can represent the mechanical strain without severe distortion is validated by forced vibration experiment. A linear time invariant system model is constructed based on the experimentally obtained frequency responses, and an optimal controller is designed for the multi-modal vibration suppression. Control performance is presented in frequency and time domains. It is found that the vibration level of the first three modes can be greatly reduced. The effect of low-pass filtering used to eliminate high frequency noise on the stability and control performance is also considered.

1. 서 론

지능 재료(smart materials)를 이용한 구조물의 진동제어에 관한 연구는 꾸준히 증가하고 있으며, 지능 구조물의 이러한 기능들을 실현하기 위해서 기능성 재료와 지능 구조물들의 특성에 대한 많은 연구가 이루어졌다.^(1,2) 여러 가지 기능성 재료들 중에서 광섬유는 재질이 유리 섬유이므로 구조물 내부에 삽입 또는 표면에 부착하기 쉽고, 작동 온도 범위가 높으며 직경이 작고 유연하여 원하는 크기의 센서를 제작하기가 용이하다. 또한 전자기파의 영향을 받지 않고, 간

섭을 이용하는 경우 광원의 파장 단위 이하의 작은 변형에 대한 감지가 가능한 장점을 가지고 있다. 또한 광섬유 센서는 변형률, 온도 등의 여러 물리량을 동시에 측정 가능한 장점이 있다.

광섬유 센서를 이용한 지능 구조물의 연구는 1980년대부터 건전성 모니터링 분야에서 두각을 나타내기 시작하였다.^(3,4) 적층 복합재 구조물의 경우 광섬유를 구조물의 내부에 삽입할 수 있어, 구조물의 표면 뿐만 아니라 내부의 변형률 또한 측정할 수 있다. 층간 분리된 복합재 구조물에 삽입된 외부 페브리-페로 간섭계(extrinsic fabry-perot interferometer, EFPI)의 신호 특성,⁽⁵⁾ 층간 분리된 복합재 보에 대한 좌굴의 발생과 층간 분리로 인한 파손의 감지,⁽⁶⁾ 충격위치 검출 등의 구조물의 건전성 모니터링에 대한 많은 연구들이 수행되었다.

진동 제어 분야에서는 압전 재료를 사용한 연구 사례를 쉽게 찾아볼 수 있고,⁽⁷⁾ 선형 압전 이론을 기초로 압전 재료가 부착된 복합재 구조물의 모델링⁽⁸⁾ 등

† 책임저자, 정희원, 한국과학기술원, 항공우주공학전공
E-mail : inlee@asdl.kaist.ac.kr

Tel : (042) 869-3717, Fax : (042) 869-3710

* 한국과학기술원 대학원 항공우주공학전공

** 한국전자통신연구원

*** 한국과학기술원 항공우주공학전공

압전 재료에 대한 내용은 비교적 많은 논문들에 소개되어 있다. 최근에는 진동 감지를 위한 센서로서 광섬유 센서가 적용되고 있다. Yang 등은⁽⁹⁾ 마이켈슨 간섭계(michelson interferometer)와 압전 작동기를 이용하여 굽힘 모드 진동을 효과적으로 줄일 수 있음을 보였으나, 단일 모드 제어에만 적용할 수 있는 단점을 가지고 있다. 광섬유 센서와 ER(electrorheological) 유체를 이용한 외팔보의 진동제어,⁽¹⁰⁾ 광섬유 센서와 압전 작동기를 사용한 외팔보의 반속도 피드백(negative velocity feedback) 제어⁽¹¹⁾ 등의 연구가 수행되었다. 광섬유 센서를 이용한 진동 제어 분야는 아직도 연구할 부분이 많은 분야로, 광섬유 센서의 진동 감지 특성에 대한 고찰이 필요하다. 본 연구에서는 현재의 광섬유 센서 제작 기술과 최적 진동 제어 기술을 통합하여 평판 구조물의 다중 모드 진동 제어를 목적으로 한다. 강제 진동 실험을 통하여 EFPI 센서의 진동 감지 특성을 고찰하고, LQG (linear quadratic gaussian) 최적 제어기(optimal controller)를 설계하여 알루미늄 평판 구조물에 대한 처음 세 개의 모드에 대한 진동 제어 실험을 통해 광섬유 센서의 진동 제어 분야에 대한 적용 타당성을 살펴보았다. 먼저 광섬유 센서의 특징과 감지 특성에 대해 간략하게 살펴보고, 제어기 설계와 실험 결과를 정리 하였다.

2. 외부 페브리-페로 간섭계(EFPI)

변위나 변형률을 측정하기 위해서 사용되는 광섬유 센서 중 빛의 간섭을 이용한 센서는 마흐-젠더(Mach-Zender), 마이켈슨(Michelson), 페브리-페로(Fabry-Perot) 간섭계(interferometer) 등이 있다. 마흐-젠더와 마이켈슨 간섭계의 경우 기준선(reference line)과 감지선(sensing line)을 따로 사용하므로 외부의 교란에 쉽게 영향을 받을 수 있다. 반면에 페브리-페로 간섭계의 경우 기준선과 감지선으로 동일한 광섬유를 사용하며, 국부적 변형률의 측정에 용이한 장점을 가지고 있다.

페브리-페로 간섭계는 게이지 구간의 광 매질이 광섬유인 내부 페브리-페로 간섭계(intrinsic fabry-perot interferometer)와 광 매질이 공기인 외부 페브리-페로 간섭계로 분류 될 수 있다. IFPI는 센서 내부에 반사막을 형성하기 위해 이산화티타늄(TiO₂)을

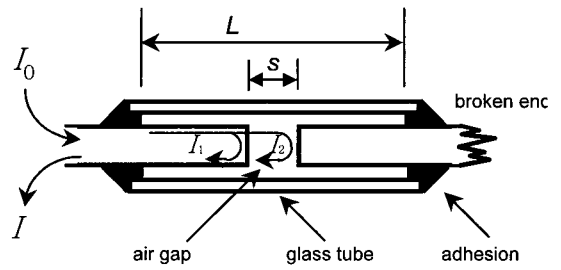


Fig. 1 Schematic diagram of EFPI

진공증착한 후 게이지 부분의 광섬유를 아크방전을 통해 용착하여 제작하므로 제작이 용이하지 않다. 또한 게이지 부분의 광매질이 광섬유이므로 변형에 의한 편광의 영향이 발생하며 반사막 증착 부분의 불연속적인 연결로 기계적 특성이 좋지 않은 단점을 가지고 있다. 또한 광섬유의 굴절률이 온도와 횡방향 응력의 영향을 받지만 EFPI센서의 경우 게이지 부분이 공기 이므로 입력광 신호의 편광에 의한 영향이나 횡방향 변형률 성분이 축방향 변형률 감지에 영향이 없는 것으로 보고 되었다.⁽¹²⁾ 본 연구에서는 EFPI 센서를 제작, 사용하였고 개략도를 Fig. 1에 나타내었다.

입사광(I_0)이 광섬유 속을 진행하여 공기 층과 만나는 첫 번째 반사면에서 반사된 빛(I_1)과 간극길이 s 만큼 진행하여 반사된 빛(I_2)이 간섭하여 출력광을 만들어 낸다. 출력광 강도(I)는 다음과 같이 조화함수의 형태로 표현될 수 있다.⁽⁶⁾

$$I \propto A(1 + B \cos \phi) \tag{1}$$

여기서, A 와 B 는 광섬유 코어의 반경, 간극 길이, 공기/유리 접촉면의 전달 상수, 개구수(numerical aperture)와 입사광 강도(I_0)로 표현되는 값이고, ϕ 는 광학적 위상을 나타낸다. 간극 길이(s)의 변화가 작은 경우 A , B 의 변화 또한 작으므로 상수로 가정할 수 있다. 광학적 위상(ϕ)과 간극길이(s)의 관계는 다음과 같다.⁽⁶⁾

$$\phi = 2ks \tag{2}$$

여기서, k 는 $2\pi n_c / \lambda_0$ 로 표현되는 파동수(wave number); n_c 는 게이지 구간에서의 굴절률, λ_0 는 진공 상태에서 레이저 광원의 파장으로 본 연구에 사용된 레이저 다이오드의 경우 1310 nm이다. 식 (2)를 이용하여 두 반사파(I_1 , I_2)의 위상차, $\Delta\phi$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

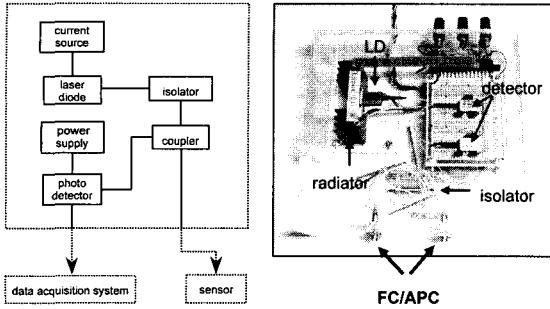


Fig. 2 Fiber optic sensor system

$$\begin{aligned} \Delta\phi &= \frac{4\pi}{\lambda_0} (n_c \cdot \Delta s + \Delta n_c \cdot s) \\ &= \frac{4\pi}{\lambda_0} (n_c \cdot \Delta L + \Delta n_c \cdot s) \end{aligned} \quad (3)$$

EFPI의 게이지 구간에서의 광 매질이 공기이므로 굴절률의 변화는 거의 없다. $n_c \cong 1$, $\Delta n_c \cong 0$, $\lambda_0 = 1310$ nm를 사용하면 $\Delta\phi$ 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\Delta\phi = 0.9593 \times 10^7 \Delta L \text{ (rad/m)} \quad (4)$$

Fig. 1에 나타난 EFPI 센서를 제작하기 위해서, 내경이 128 μm 인 유리관에 재킷을 제거한 125 μm 직경의 광섬유를 양쪽에 삽입하여 예폭시로 접착하였다. 제작된 센서의 게이지 길이(L)와 간극 길이는 각각 5.13 mm, 55 μm 이다. 본 연구에서 사용된 광섬유 센서 시스템의 구성은 Fig. 2와 같다. 광원으로 레이저 다이오드가 사용되었고, 레이저 다이오드를 구동하기 위한 전류 공급기(current source), 레이저 광원의 역방향 전파를 방지하는 광격리기(isolator), 레이저를 분기하는 양방향 연계기(bi-directional coupler), 센서로부터 나오는 빛을 감지하기 위한 광검출기(photo detector), 광검출기 구동을 위한 전원 공급기로 구성되어 있다.

3. EFPI 센서의 진동 감지 특성

Fig. 1에 개략도로 나타난 EFPI 센서가 구조물의 표면 또는 내부에 삽입될 경우 구조물에 발생하는 변형은 게이지 길이(L)의 변화를 유발하고 식 (3)에 나타난 것과 같이 간섭 신호의 위상 변화가 발생하게 된다. 간섭 센서의 특성상 EFPI 센서의 출력광 강도는 기계적 변형률을 정확하게 표현하지는 못한다. Fig. 3은 식 (1)에서 $A=B=1$ 인 경우 출력광 강도

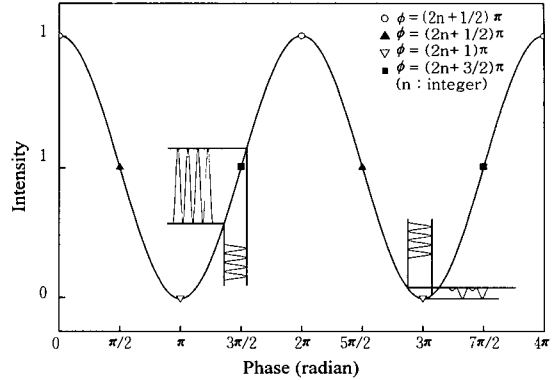


Fig. 3 Relation between intensity and strain variations

의 변화를 나타낸 그림이다. 도식한 바와 같이 동일한 진동에 의해 유발되는 두 반사파의 위상 변화에 대해서도 출력광 강도는 두 반사파의 초기 위상 차에 따라 다른 형태로 나타날 수 있다.

초기 위상차가 극대 혹은 극소 값 부근일 경우 간섭 신호는 심하게 왜곡된 진동 정보를 나타낼 수 있다. 초기 위상이 $\phi = (2n+1/2)\pi$ 또는 $\phi = (2n+3/2)\pi$ 인 경우 왜곡 없이 진동을 측정할 수 있는 범위가 가장 넓어진다. 식 (1)에서 $A=B=1$ 인 경우, 제작된 EFPI 센서가 5% 오차 범위 내에서 선형적으로 측정 가능한 변형률 범위는 초기 위상이 $\phi = (2n+1/2)\pi$ 또는 $\phi = (2n+3/2)\pi$ 일 때 $(-11.21 \sim 11.21) \times 10^{-6}$ 이다. 초기 위상이 $\phi = (2n+13/8)\pi$, $\phi = (2n+14/8)\pi$, $\phi = (2n+15/8)\pi$ 인 경우에 대해서는 5% 오차 범위 내에서 선형적으로 측정 가능한 변형률 범위는 각각 $(-6.782 \sim 4.226) \times 10^{-6}$, $(-2.113 \sim 1.977) \times 10^{-6}$, $(-0.852 \sim 0.852) \times 10^{-6}$ 로 줄어들게 된다. 그러나, 초기 위상은 센서를 구조물에 삽입 또는 부착하는 과정에서 생길 수 있는 잔류 변형률(residual strain)에 의해 영향을 받을 수 있으므로, 주어진 레이저 광원에 대해서 초기 위상을 임의로 설정하기는 어려운 일이다. 파장을 조절할 수 있는 광원을 사용한다면 초기 위상을 원하는 값으로 설정할 수는 있으나, 본 연구와 같이 고정된 파장의 광원이 사용되는 경우에는 EFPI 센서를 적용함에 있어 유효한 선형 감지 구간을 확인할 필요가 있다.

본 연구에 사용된 시편은 알루미늄 평판으로, 형상 및 치수는 Fig. 4에 나타내었다. EFPI센서의 경우는 변형률 변화에 민감하도록 시편의 고정 단에 가깝게

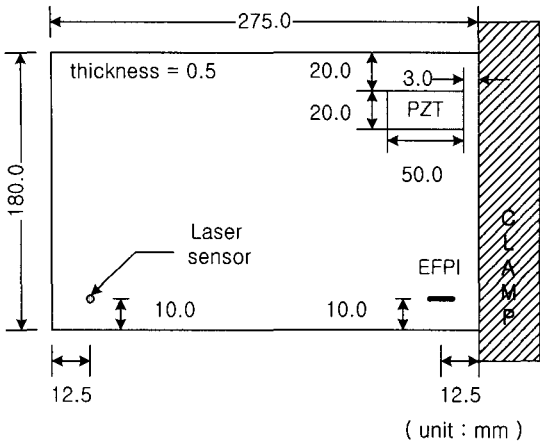


Fig. 4 Schematic diagram of the aluminum plate

위치 시켰고, 레이저 센서는 변위에 민감하도록 시편의 끝 부분에 가까운 곳에서 측정 하였다. EFPI센서의 위치와 레이저 센서의 위치를 달리한 것은 두 가지 센서가 측정하는 물리량이 다르기 때문이다. EFPI 센서는 구조물의 변형을 변화에 따라 출력광 강도가 변화하는 센서이고, 레이저 센서의 경우는 변위를 측정하는 센서로 두 가지의 센서가 동일한 물리량에 반응하지는 않는다. 보다 정확한 비교를 위해서는 EFPI 센서와 스트레인 게이지의 신호를 비교하는 것이 타당하다고 할 수 있으나, 본 논문에서는 EFPI센서와 상용 센서와의 특성 비교를 위해 가용한 센서 중에서 레이저 센서를 사용 하였다. 그래서, EFPI센서의 경우는 변형을 변화에 민감하도록 시편의 고정 단에 가깝게 위치 시켰고, 레이저 센서는 변위에 민감하도록 시편의 끝 부분에 가깝게 위치 시켰다.

평판의 첫번째 굽힘 모드의 주파수(5.73 Hz)로 가진 경우의 EFPI센서의 신호와 레이저 변위계의 신호를 Fig. 5에 나타내었다. 진폭이 증가함에 따라 EFPI 센서의 신호가 왜곡됨을 살펴볼 수 있다. 본 연구의 진동 제어 실험에서는 EFPI 센서가 심각한 왜곡 없이 기계적 변형을 나타낼 수 있는 범위 내에서 수행되었다. 또한 EFPI 센서의 출력 신호가 가지고 있는 D.C. 성분을 제거하기 위하여 버터워스 고주파 통과필터(Butterworth high-pass filter)를 사용 하였다.

Fig. 5에서 진폭이 훨씬 작은 부분에 설치한 EFPI 센서의 신호의 왜곡이 심한 것은 레이저 변위계로 측정한 점 보다 변형률이 훨씬 크게 발생 되는 부분으로 Fig. 3에서 볼 수 있듯이 출력광 강도의 변화가

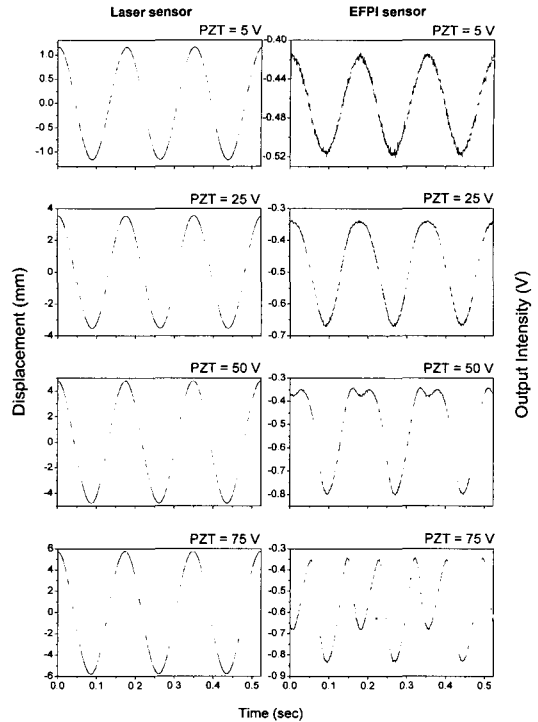


Fig. 5 Comparison of displacement and intensity signals

심하게 나타나는 부분이다. 이러한 특성을 가지는 센서를 진동 제어에 이용하고자 하는 이유들은 광섬유 센서가 여러 가지 물리량을 동시에 측정할 수 있는 장점을 가지고, 보다 다양한 환경 하에서도 사용이 가능하며, 구조물 내부에 삽입하는 것이 용이한 점들을 들 수 있다. 본 논문은 이러한 장점들을 보여주지는 못하지만, 보통의 구조물의 건전성 모니터링 부분에 추가적으로 진동 저감을 위한 기술이 필요할 경우에는 가용 할 것으로 기대된다.

EFPI 센서의 신호 왜곡이 발생하는 비선형 구간에서의 진동 제어에 대한 부분은 수행 중에 있으며, 어느 정도의 비선형 특성이 있어도 제어 성능 저하는 심하지 않다. 물론 비선형성이 아주 심한 경우에는 선형 제어기를 사용하기는 힘들고, 이런 경우에는 EFPI센서 보다는 다른 메커니즘의 센서가 적당할 것이다.

4. 압전 작동기

압전재료(piezoelectric material)는 물질에 전기장을 가하면 변형이 생기고(역방향 효과), 반대로 변형이 생기면 전기장이 형성되는(순방향 효과) 재료이다.

이러한 순방향, 역방향 효과는 각각 압전 감지기와 작동기의 기초 원리가 되고, 전기에너지와 기계적 에너지를 변환하는 기능을 한다. 압전 재료를 구조물에 삽입 또는 부착하여 진동 제어를 위한 시스템을 구성할 수 있고, 이러한 구조물에 대한 해석과 실험적 연구들은 많은 부분 이루어졌고, 여러 가지 형태로 가공된 제품을 생산하는 업체 또한 다수이다. 압전 감지기와 작동기가 포함된 구조물에 대한 해석은 고전적층판 이론, 횡전단 변형 판이론에 기초한 많은 연구들이 수행되었다.⁽⁸⁾ 대부분의 유한 요소 프로그램들은 선형 압전 이론에 기초하여 재료의 탄성장과 압전 재료의 전기장을 연계하여 구성되고, 최근에 나온 상용 유한 요소 해석 프로그램에서도 압전재료의 모델링이 가능하다. 본 연구에서는 이러한 해석은 수행하지 않았고, 실험을 통한 시스템 특성 파악을 수행하였다. 본 연구에 사용된 압전 작동기는 일본 Fuji Ceramics 사의 C-8 모델로서, 형상은 길이 50 mm, 폭 20 mm, 두께 0.4 mm 이다. 압전 작동기는 에폭시 접착제를 이용하여 평판 구조물의 표면에 부착되었다.

5. 제어기 설계

본 연구에서는 다중 모드 제어를 위하여 LQG 최적 제어를 사용하였다. 제어 대상인 평판 구조물의 수학적 모델은 시스템 식별을 이용하여 구하였다. 실험을 통해 압전 작동기와 EFPI 센서 사이의 주파수 응답함수를 구하고, 극점(pole)과 유수(residue) 정보를 이용하여 시스템의 수학적 모델을 구하였다. 제어 대상으로 선정한 처음 세 모드는 각각 5.73, 17.79, 33.97 Hz로 50 Hz 범위 내에 있으므로 50 Hz 범위 내의 실험 데이터를 이용하였다. Fig. 6에 도식한 바와 같이 획득된 모델이 50 Hz 범위 내의 시스템 특성을 충분히 표현하고 있음을 알 수 있다.

제어기 설계는 참고문헌 (13)의 절차를 따라 수행되었다. 우선 다음과 같은 확률적 시스템을 고려해 보자.

$$\dot{x} = Ax + Bu + \xi, \quad y = Cx + \theta \quad (5)$$

여기서, 시스템 잡음, $\xi(t)$ 과 측정 잡음, $\theta(t)$ 은 상관관계가 없는 평균이 0인 가우시안 백색 잡음(Gaussian white-noise)이다. LQG 제어 문제는 다음

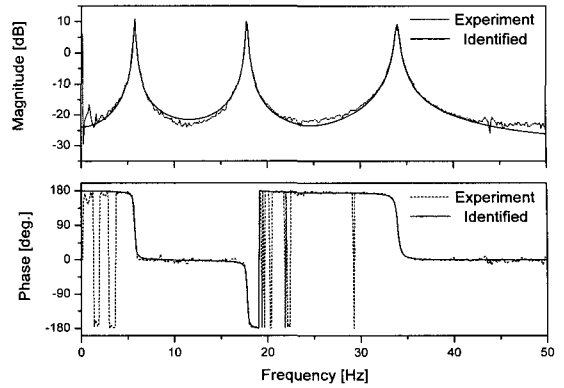


Fig. 6 Frequency responses of real and identified models

과 같은 성능 지수를 최소화 하는 제어 입력을 생성하는 동적 보상기를 찾는 것이다.

$$V = \lim_{t \rightarrow \infty} E \{ x^T Q x + u^T R u \} \quad (6)$$

제어기 설계에 사용되는 측정 잡음의 공분산 값, θ 은 진동이 없는 상태의 센서에서 나오는 잡음을 측정하여 계산하였다.

$$\theta = 3.9384 \times 10^{-9} \quad (7)$$

시스템 잡음의 공분산 값은 측정 잡음의 경우와 같은 크기로 가정하였고, 가중 행렬 $R = [1]$ 로 설정하고, Q 는 대각 행렬 형태로 설정하였다. 시뮬레이션을 통해 각 공진 주파수에서 주파수 응답함수의 크기가 20 dB 가량 줄어들도록 제어기를 설계하였다. 이 때 사용된 Q 값은 다음과 같다.

$$Q = 10^4 \times \text{diag}(1, 1, 3, 3, 8, 8) \quad (8)$$

상태 추정기, $\hat{x} = A\hat{x} + Bu + K_f(y - C\hat{x})$ 의 칼만 필터 게인(K_f)과 상태 피드백 게인(K_c)은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} K_f &= SC^T \theta^{-1}, \quad 0 = AS + SA^T + \varepsilon - SC^T \theta^{-1} CS \\ K_c &= R^{-1} B^T P, \\ 0 &= A^T P + PA + Q - PBR^{-1} B^T P \end{aligned} \quad (9)$$

설계된 제어기를 캐스캐이드 형태로 구현(cascade realization)하면 다음과 같고, 주파수 영역 시뮬레이션 결과는 Fig. 7과 같다.

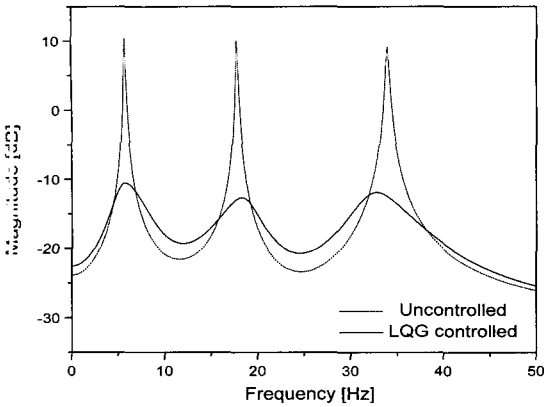


Fig. 7 Simulated frequency responses of the uncontrolled and the controlled systems

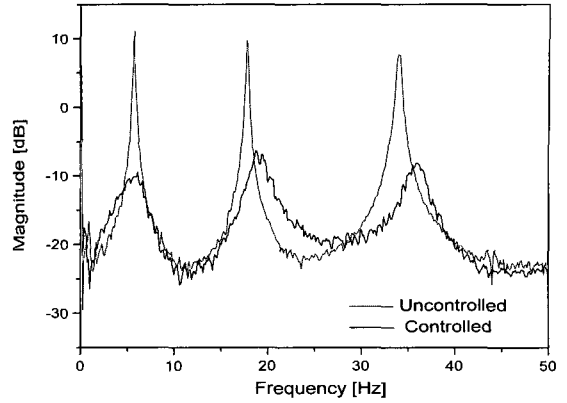


Fig. 8 Experimental frequency responses of the uncontrolled and the controlled systems

$$F(s) = \left[\frac{A - BK_c - K_f C}{K_c} \quad \frac{K_f}{0} \right] = \left[\begin{array}{cc} a_f & b_f \\ c_f & d_f \end{array} \right]$$

($F(s)$: the transfer function from y to $-u$)

$$a_f = \begin{bmatrix} -24.631 & 46.164 & 40.326 & 11.823 & -5.7881 & 76.439 \\ -35.600 & -25.195 & 2.323 & -34.247 & -42.802 & -23.606 \\ 17.788 & 1.6295 & -31.375 & 115.75 & 20.231 & -48.037 \\ 4.0575 & -28.725 & -115.29 & -40.034 & -46.279 & -37.480 \\ -9.9373 & -21.466 & 19.729 & -30.752 & -48.366 & 221.55 \\ 17.434 & -18.538 & -27.779 & -24.082 & -228.84 & -66.546 \end{bmatrix}$$

$$b_f = [-0.72010 \quad 1.1481 \quad 0.10803 \quad 1.3728 \quad 0.89209 \quad 1.0388]^T$$

$$c_f = [131.38 \quad 29.255 \quad -229.87 \quad 53.125 \quad 179.53 \quad -339.09]$$

$$d_f = [0] \quad (10)$$

6. 실험 결과 및 토의

설계된 제어기는 Matlab으로 프로그래밍하고 DSP 보드(DS1102)를 사용하여 구현하였고, 주파수 영역에서의 정상상태 응답과 시간 영역에서의 과도 응답을 통해 제어 성능을 살펴 보았다.

우선 주파수 응답을 측정하기 위해, 압전 작동기를 랜덤 가진을 하면서 발생된 EFPI 센서 신호를 제어기에 입력하여 생성된 제어 신호를 랜덤 신호에 더하여 고전압 앰프를 거쳐 압전 작동기에 부가하는 방식으로 실험을 수행 하였다. Fig. 8은 실험을 통해 측정된 주파수 응답함수를 나타내고 있다. 세 모드에서 -20.5 dB, -16.2 dB, -15.7 dB의 진동 저감 효과를 얻을 수 있었다.

진동 제어 대상인 구조물과 진동 제어를 위해 사용한 LQG 제어기는 동적 시스템이고, 피드백에 의해 생성되는 폐-루프(closed-loop) 시스템은 원래 구조물에 비해 차수가 증가된 시스템으로 동일한 극점을 가

지지 않는다. 피드백에 의해 폐-루프 시스템을 구성할 때 구조물의 극점들은 바뀌게 되고 이로 인해 Fig. 8에서와 같이 공진 주파수의 변화가 발생할 수 있다. 이는 설계되는 제어기에 따라 다르게 나타날 수 있으며, 폐-루프 시스템에 대한 특별한 제약이 있다면 충분한 시뮬레이션을 통해 제어기 설계가 이루어져야 하지만, 본 연구에서는 제어 성능에 주안점을 두고 실험을 수행하였다.

시간 영역에서의 제어 성능을 살펴 보기 위해, 구조물의 고유 진동수의 정현파 신호를 고전압 앰프를 거쳐 압전 작동기에 부가하여 구조물을 충분히 가진 시킨 후 가진력을 제거한 경우와 이와 동시에 제어기를 작동한 결과를 Figs. 9~11에 나타내었다. 여기서, 1초를 기준으로 가진력이 제거되고 제어가 시작됨을 표시하도록 하였다. 첫 번째 모드의 경우 제어하지 않은 경우 잔류 진동이 없어지기 까지 상당히 긴 시

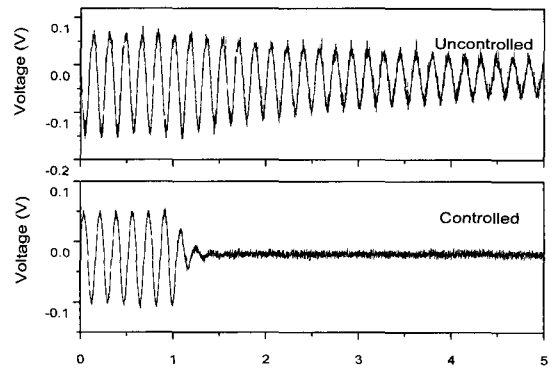


Fig. 9 Transient vibration control result for the first mode

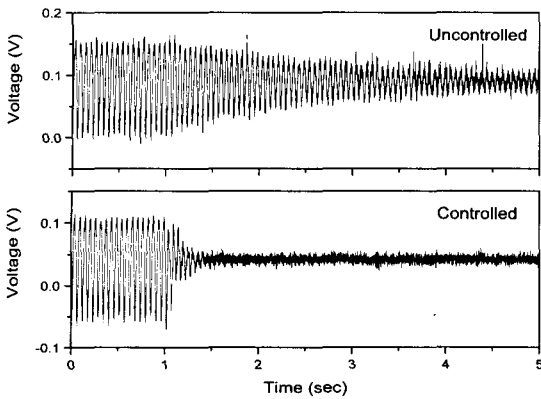


Fig. 10 Transient vibration control result for the second mode

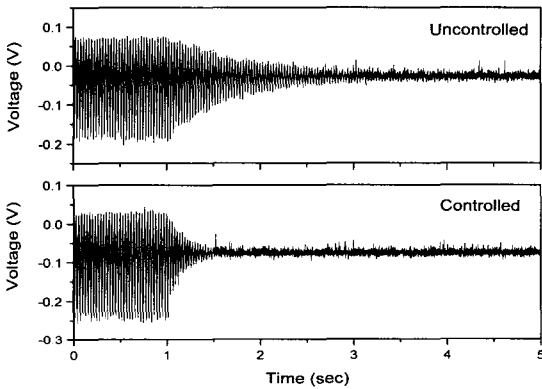


Fig. 11 Transient vibration control result for the third mode

간이 소요된다. 반면에 제어를 작동한 경우 약 0.5 초 정도 지나면 진동이 거의 사라진다. 두 번째, 세 번째 모드의 결과도 유사하다. 이상과 같이 세 모드의 진동이 성공적으로 저감 됨을 살펴볼 수 있다.

제어기 설계 단계의 주파수 영역 시뮬레이션 결과와 실험을 통해 측정된 주파수 응답함수를 살펴 보면 페루프 시스템의 고유 진동수가 일치하지 않는 것을 살펴볼 수 있다. 이러한 결과의 원인은 실험 시 사용된 저주파 통과 필터의 영향이라고 사료된다. 많은 경우 실험에 있어 전기적 잡음을 포함한 원하지 않는 잡음으로 시스템이 영향을 받을 수 있다. 이런 경우 저주파 통과 필터를 사용하여 고주파 잡음을 배제할 수 있다. 본 연구에서는 60 Hz의 차폐 주파수(cutoff frequency)를 가지는 2차의 버터워스 저주파 통과 필터를 사용하였다. 제어 하고자 하는 모드의 주파수가 필터의 차폐 주파수에 비해 충분히 작다고 하더라도,

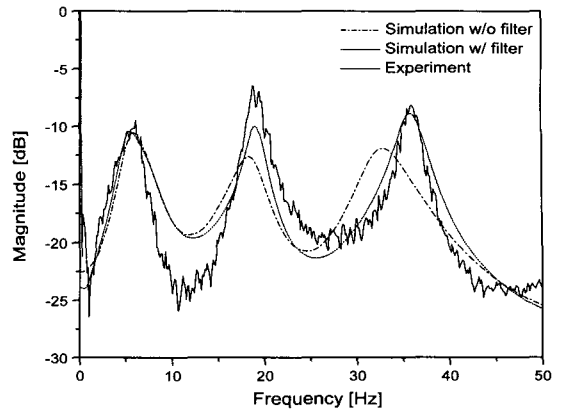


Fig. 12 Simulated and experimental frequency responses including the filter effect

필터를 통과한 신호의 위상 변화는 면밀히 고찰할 필요가 있다. 필터의 동적 특성으로 인해 전체 페루프 시스템의 극점이 이동하게 되고 페루프 시스템의 고유 진동수의 변화가 생기게 된다. 실험 결과와 필터의 영향을 고려한 전체 페루프 시스템의 시뮬레이션 결과를 Fig. 12에 나타내었다. 필터를 고려한 경우 실험 결과에 보다 근접하는 시뮬레이션 결과를 나타낼 수 있다. 실험에 있어 잡음 제거를 위해 사용하는 필터가 시스템에 미칠 수 있는 악영향을 방지하기 위해서는 필터의 구조 설정에 유의해야 할 것이다.

7. 결론

본 연구에서는 EFPI 센서를 평판 구조물의 진동 제어 분야에 적용하였다. EFPI 센서의 감지 특성은 상용 레이저 변위계와 비교를 통해 고찰 하였다. 두 반사면의 초기 간극 길이와 구조물의 진폭에 따라 왜곡된 신호를 발생 시킴을 확인 하였다. 시스템의 수학적 모델은 실험으로 구한 주파수 응답함수를 통해 구하였고 다중 모드 제어를 위해 LQG 제어기를 설계 하였다. 설계된 제어기의 성능은 주파수 영역과 시간 영역 실험을 통해 고찰 하였다.

실험 결과를 통해 EFPI 센서와 압전 작동기를 사용하여 세 모드의 진동이 성공적으로 저감 됨을 살펴볼 수 있었다. 광섬유 센서는 진전성 모니터링을 포함한 많은 분야 뿐만 아니라 진동 제어 분야에서도 좋은 성능을 발휘할 수 있음을 알 수 있다. 실제 실험에 있어서는 원하지 않는 잡음을 제거하기 위해 필

터를 사용할 경우 전체 페루프 시스템의 안정성 등을 고려하여 필터의 구조 설계에 유의하여야 할 것이다.

후 기

본 연구는 2000년도 과학기술부의 국가지정 연구실 사업(2000-N-NL-01-C-250)에 의해 수행된 연구 결과의 일부이며, 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

(1) Bailey, T. and Hubbard, Jr. J. E., 1985, "Distributed Piezoelectric Polymer Active Vibration Control of a Cantilever Beam," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 8, pp. 605~611.

(2) Han, J. H., Rew, K. H. and Lee, I., 1997, "An Experimental Study for Active Vibration Control of Composite Structures with a Piezo-ceramic Actuator and a Piezo-film Sensor," *Smart Materials and Structures*, Vol. 6, pp. 549~558.

(3) Waite, S. R., and Sage, G. N., 1988, "The Failure of Optical Fibres Embedded in Composite Materials," *Composites*, Vol. 19, pp. 288~294.

(4) Glossop, N. D. W., Dubois, S., Tsaw, W., Leblanc, M., Lymer, J., Measures, R. M. and Tennyson, R. C., 1990, "Optical Fibre Damage Detection for an Aircraft Composite Leading Edge," *Composites*, Vol. 1, pp. 71~80.

(5) Hong, C. S., Park, J. W., Ryu, C. Y. and Kang H. K., 1999, "Signal Characteristics of EFPI In the Delaminated Composite," *Proc. of 13th International Conference on Optical Fiber Sensors*,

Kyongju, Korea, pp. 192~195.

(6) Park, J. W., Ryu, C. Y., Kang, H. K. and Hong, C. S., 2000, "Detection of Buckling and Crack Growth in the Delaminated Composites Using Fiber Optic Sensor," *Journal of Composite Materials*, Vol. 34, pp. 1602~1623.

(7) 류근호, 한재홍, 이인, 1997, "압전 감지기/작동기를 이용한 복합재 평판의 최적진동제어실험," *한국소음진동공학회지*, 제 7 권, 제 1 호, pp. 161~168.

(8) 한재홍, 이인, 1995, "유한요소법을 이용한 지능 복합재 구조의 진동 제어 특성 고찰," *한국항공우주학회지*, 제 23 권, 제 1 호, pp. 85~96.

(9) Yang, S. M. and Jeng, J. A., 1997, "Vibration Control of a Composite Plate with Embedded Optical Fiber Sensor and Piezoelectric Actuator," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 8, pp. 393~400.

(10) Leng, J., Asundi, A. and Liu, Y., 1999, "Vibration Control of Smart Composite Beams with Embedded Optical Fiber Sensors and ER Fluid," *Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 121, pp. 508~509.

(11) Chun, B. S., Park, W. S., Park, H. C., Hwang, W. and Han, K. S., 1997, "Vibration Control of Laminated Composite Beam Using Optical Fiber Sensor," *Proc. 5th Japan International SAMPE Symposium*, pp. 961~966.

(12) 강현규, 2001, "광섬유 센서를 이용한 스마트 복합재 구조물의 다중 파라메터 동시 측정에 관한 연구," *박사학위 논문*, 한국과학기술원

(13) Dorato, P., Abdallah, C. and Cerone, V., 1995, *Linear Quadratic Control*, Prentice Hall, New Jersey.