

광섬유 센서를 이용한 평판의 진동 감지 및 제어

Vibration Sensing and Control of a Plate Using Optical Fiber Sensor

°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

Key Words : 광섬유 센서(optical fiber sensor), 압전 작동기(PZT actuator), 진동 제어(vibration control)

ABSTRACT

Vibration control of a plate using an optical fiber sensor and a PZT actuator is considered in this study. An aluminum plate with attached Extrinsic Fabry-Perot Interferometer (EFPI) and PZT 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 numerical model of the plate is constructed based on the experimentally obtained frequency responses, and an optimal controller is designed for the multi-modal vibration suppression. 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. 서론

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 이루어 졌다.^(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, 간섭을 이용하는 경우 광원의 파장 단위 이하의 작은 변형에 대한 감지가 가능한 장점을 가지고 있다.

광섬유 센서를 이용한 지능 구조물의 연구는 30 년대 말부터 건전성 모니터링 분야에서 시작되었다.^(3,4) 광섬유는 적층 복합재료의 내부에 삽입될 수 있어, 구조물의 표면 뿐만 아니라 내부의 변형

을 측정할 수 있다. 층간 분리된 구조물에 삽입된 외부 페브리-페로 간섭계(Extrinsic Fabry-Perot Interferometer, EFPI)의 신호 특성⁽⁵⁾, 좌굴과 층간 분리로 인한 파손의 감지⁽⁶⁾, 충격위치 검출 등의 구조물의 건전성 모니터링에 대한 많은 연구들이 수행되었다.

최근에는 진동의 감지와 제어 분야에 광섬유 센서가 적용되고 있다. Yang 등은⁽⁷⁾ 마이켈슨 간섭계(Michelson Interferometer)와 PZT 작동기를 이용하여 굽힘 진동을 효과적으로 줄일 수 있음을 보였고, 광섬유 센서와 ER(Electrorheological) 유체를 이용한 외팔보의 진동제어⁽⁸⁾, 광섬유 센서와 PZT 작동기를 사용한 외팔보의 반속도 피드백(negative velocity feedback) 제어⁽⁹⁾ 등의 연구가 수행되었다. 광섬유 센서를 이용한 진동 제어 분야는 아직도 연구할 부분이 많은 분야로, 본 연구에서는 현재의 광섬유 센서 제작 기술과 최적 진동 제어 기술을 통합하여 평판 구조물의 다중 모드 진동 제어를 수행함을 목적으로 한다. 강제 진동 실험을 통하여 EFPI 센서의 진동 감지 특성을 고찰하고, LQG(Linear Quadratic Gaussian) 최적 제어기(optimal controller)를 설계하여 알루미늄 평판 구조물의 처음 세 개의 모드를 제어하는 실험을 수행하였다.

* 한국과학기술원 항공우주공학과

** 한국전자통신연구원

*** 한국과학기술원 항공우주공학과, 교수

2. 외부 페브리-페로 간섭계(EFPI)

변위나 스트레인을 측정하기 위해서 사용되는 광섬유 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 변형율의 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 간섭계(Extrinsic Fabry-Perot Interferometer)로 분류 될 수 있다. IFPI는 제작이 용이하지 않고 기계적 특성이 좋지 않으며 신호의 맥놀이(beatting) 현상과 같은 단점이 있다. 본 연구에서는 이러한 단점들이 없는 EFPI 센서를 제작, 사용하였고 개략도를 Fig.1에 나타내었다.

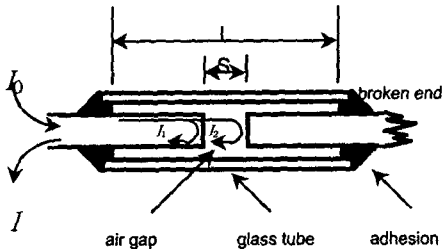


Fig. 1 Schematic Diagram of EFPI.

출력광의 세기(I)는 다음과 같이 조화 함수의 형태로 표현될 수 있다.

$$I \propto A(1 + B \cos \phi) \quad (1)$$

여기서, A 와 B 는 광섬유 코어의 반경, 간극 길이, 공기/유리 접촉면의 전달 상수, 개구수(Numerical Aperture)로 표현되는 값이고, ϕ 는 광학적 위상을 나타낸다. 간극 길이, s ,의 변화가 작은 경우 A , B 의 변화 또한 작으므로 상수로 가정하였다. 광학적 위상, ϕ 과 간극길이, s ,의 관계는 다음과 같다.

$$\phi = 2ks \quad (2)$$

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

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

EFPI의 게이지 구간에서의 광 매질이 공기이므로 굴절율의 변화는 거의 없다. $n_c \approx 1, \Delta n_c \approx 0, \lambda_0 = 1310 \text{ nm}$ 를 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 나타낸 EFPI 센서를 제작하기 위해서, 내경이 $128 \mu\text{m}$ 인 유리관에 제킷을 제거한 $125 \mu\text{m}$ 직경의 광섬유를 양쪽에 삽입하여 에폭시로 접착하였다. 제작된 센서의 게이지 길이, L ,와 간극길이, s ,는 각각 $5.13 \text{ mm}, 55 \mu\text{m}$ 이다. 본 연구에서 사용된 광섬유 센서 시스템의 구성은 Fig.2와 같다.

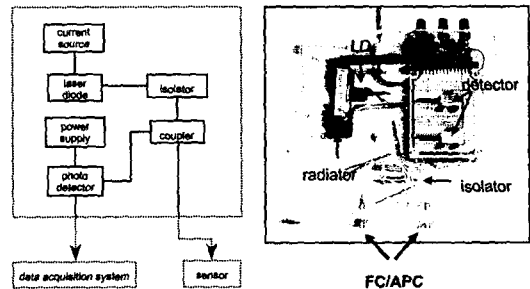


Fig. 2 Fiber optic sensor system.

3. EFPI 센서의 진동 감지 특성

간섭 센서의 특성상 EFPI 센서의 출력광 강도는 기계적 변형율을 정확하게 표현하지는 못한다. Fig.3에 도식한 바와 같이 동일한 진동에 대해서도 EFPI 센서의 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. 따라서, EFPI 센서를 적용함에 있어 유효한 선형 감지 구간을 확인 할 필요가 있다.

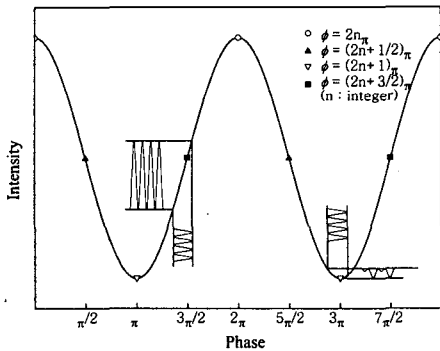


Fig. 3 Relation between intensity and strain variations.

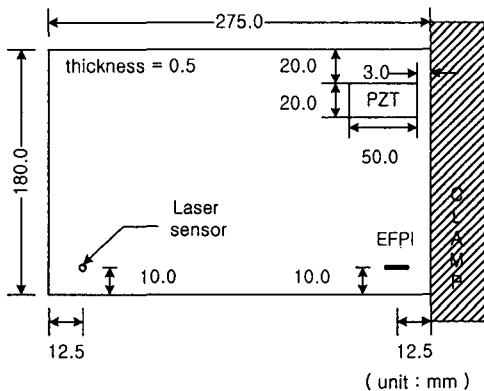


Fig. 4 Fiber optic sensor system.

본 연구에 사용된 시편은 알루미늄 평판으로, 센서와 작동기를 부착한 형태는 Fig.4 와 같다. EFPI 센서의 감지 특성과 비교를 위해 레이저 변위계를 사용하였다. 평판의 첫번째 굽힘 모드의 주파수, 5.73 Hz로 가진 한 경우의 EFPI 센서의 신호와 레이저 변위계의 신호를 Fig.5 에 나타내었다. 진폭이 증가함에 따라 EFPI 센서의 신호가 왜곡됨을 살펴볼 수 있다. 본 연구의 진동 제어 실험에서는 EFPI 센서가 심각한 왜곡 없이 기계적 변형율을 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 사용하였다.

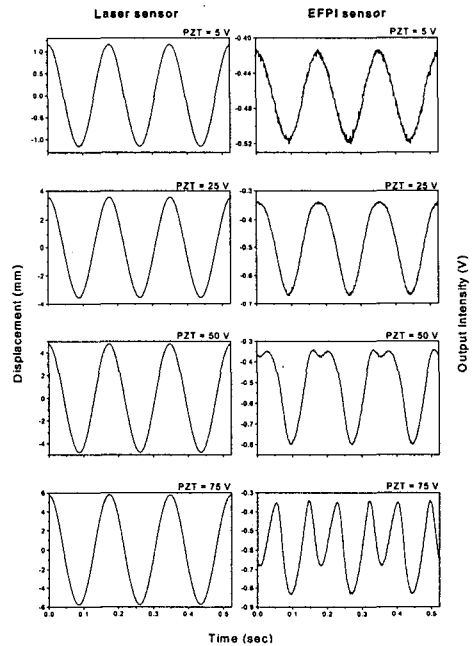


Fig. 5 Comparison of displacement and intensity signals.

4. 제어기 설계

본 연구에서는 다중 모드 제어를 위하여 LQG 제어기를 사용하였다. 제어 대상인 평판 구조물의 수학적 모델은 시스템 식별을 이용하여 구하였다. 실험을 통해 PZT 작동기와 EFPI 센서 사이의 주파수 응답함수를 구하고, 극점(pole)과 유수(residue) 정보를 이용하여 시스템의 수학적 모델

을 구하였다. 실험과 시스템 식별을 통해 구해진 모델의 주파수 응답함수를 Fig.6 에 나타내었다. 수학적 모델이 50 Hz 주파수 범위 내에서 시스템의 특성을 잘 표현하고 있음을 알 수 있다.

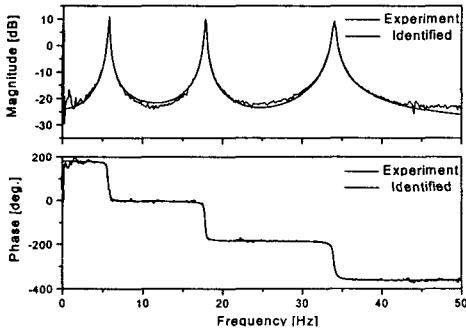


Fig. 6 Frequency responses of real and identified models.

제어 대상은 처음 3 개의 모드로 선정 하였고, LQG 제어를 설계하기 위해서 다음과 같은 확률적 시스템을 고려할 수 있다.

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

여기서, 시스템 잡음, $\xi(t)$,과 측정 잡음, $\theta(t)$,은 상관관계가 없는 평균이 0 인 가우시안 백색 잡음 (Gaussian white-noise)이다. LQG 제어 문제는 다음과 같은 성능 지수(performance measure)를 최소화 하는 제어 입력을 생성하는 동적 보상기(dynamic compensator)를 찾는 것이다.

$$V = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E \{ x^T Q x + u^T R u \} \quad (6)$$

제어기 설계에 사용되는 측정 잡음의 공분산 값, Θ ,은 진동이 없는 상태의 센서에서 나오는 잡음을 측정하여 계산하였고, $\Theta = 3.9384 \times 10^{-9}$, 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.

$$Q = 10^4 \times \text{diag}(1, 1, 3, 3, 8, 8) \quad (7)$$

설계된 제어기는 다음과 같고, 주파수 영역에서의 시뮬레이션 결과는 Fig.7 에 나타내었다.

$$\begin{aligned} a_r &= \begin{bmatrix} -24.631 & 46.164 & 40.326 & 11.823 & -5.7881 & 76.439 \\ -35.600 & -25.195 & 2.3231 & -34.247 & -42.802 & -23.606 \\ 17.788 & 1.6295 & -31.375 & 115.75 & 20.231 & -48.037 \\ 4.0575 & -28.725 & -115.29 & -40.034 & -46.279 & -37.480 \\ -9.9373 & -21.466 & 19.729 & -30.752 & -48.366 & 221.55 \\ 17.434 & -18.538 & -27.779 & -24.082 & -228.84 & -66.546 \end{bmatrix} \\ b_r &= [-0.72010 \quad 1.1481 \quad 0.10803 \quad 1.3728 \quad 0.89209 \quad 1.0388]^T \\ c_r &= [131.38 \quad 29.255 \quad -229.87 \quad 53.125 \quad 179.53 \quad -339.09] \\ d_r &= [0] \end{aligned} \quad (8)$$

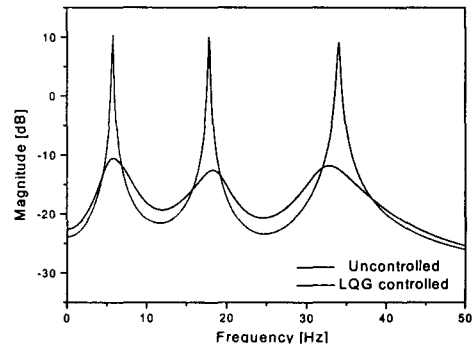


Fig. 7 Simulated frequency responses of the uncontrolled and the controlled systems.

5. 실험 결과 및 토의

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

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

다음으로 시간 영역에서의 제어 성능을 살펴 보기 위해, 구조물의 고유 진동수로 충분히 가진 시킨 후 가진력을 제거한 경우와 이와 동시에 제어기를 작동한 결과를 Fig.9, 10, 11 에 나타내었다.

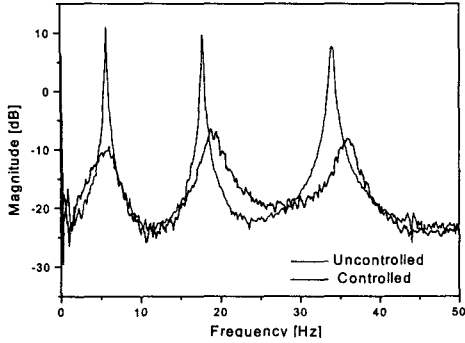


Fig. 8 Experimental frequency responses of the uncontrolled and the controlled systems.

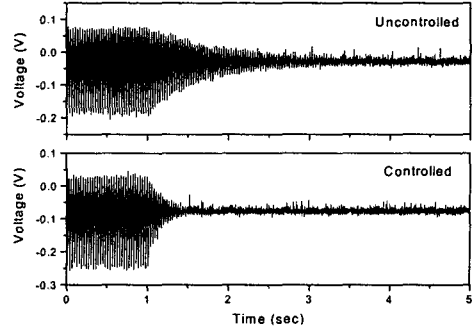


Fig. 11 Transient vibration control result for the third mode.

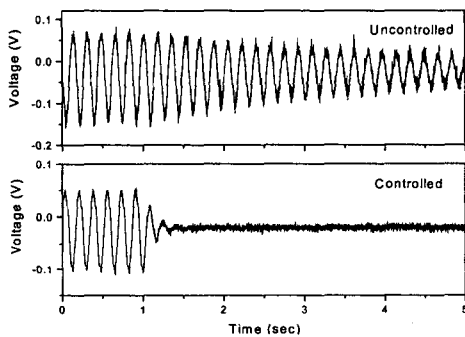


Fig. 9 Transient vibration control result for the first mode.

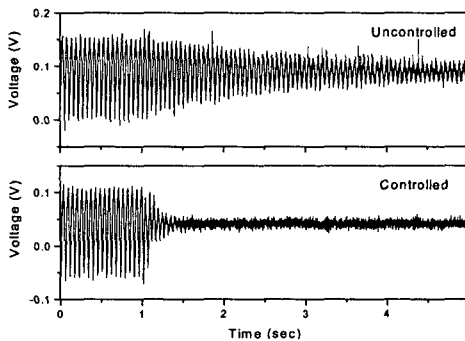


Fig. 10 Transient vibration control result for the second mode.

Fig. 9, 10, 11 에서 1 초를 기준으로 가진력이 제거되고 제어가 시작됨을 표시하도록 하였다. 첫 번째 모드인 경우 제어하지 않은 경우 잔류 진동이 없어지기 까지 상당히 긴 시간이 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. 실험 시 사용된 저주파 통과 필터의 영향이 그 원인으로 사료된다. 많은 경우 실험에 있어 전기적 잡음을 포함한 원하지 않는 잡음으로 시스템이 영향을 받을 수 있다. 본 연구에서는 60 Hz 의 차폐 주파수를 가지는 2 차의 버터워스 저주파 통과 필터를 사용하였다. 이러한 경우 필터를 통과한 신호의 크기의 변화는 미비하나 제어하고자 하는 모드를 포함하는 주파수 영역에서의 위상 변화는 면밀히 고찰되어야 할 것이다. 필터의 동적 특성으로 인해 전체 페루프 시스템의 구조물의 극점이 이동하게 되고 페루프 시스템의 고유 진동수의 변화가 생기게 된다. 실험 결과와 필터의 영향을 고려한 전체 페루프 시스템의 시뮬레이션 결과를 Fig.12 에 나타내었다. 필터를 고려한 경우 실험 결과에 보다 근접하는 시뮬레이션 결과를 나타남을 살펴볼 수 있다.

전체 시스템의 안정성 마진은 Gain margin = 3.17, Phase margin = 44.8°로 시스템의 안정성은 유지되고 있음을 알 수 있다. 실험에 있어 간단히 잡음 제거를 위해 사용하는 필터가 시스템에 미칠 수

있는 악영향을 방지하기 위해서는 필터의 구조 설정 유의할 필요가 있다.

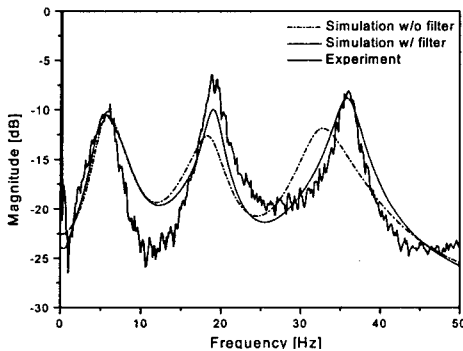


Fig. 12 Simulated and experimental frequency responses including the filter effect.

6. 결론

본 연구에서는 EFPI 센서를 평판 구조물의 진동제어 분야에 적용하였다. EFPI 센서의 감지 특성은 상용 레이저 변위계와 비교를 통해 고찰하였다. 두 반사면의 초기 간극 길이와 구조물의 진폭에 따라 왜곡된 신호를 발생 시킴을 확인하였다. 그러나, 레이저 광원의 파장을 변화시킴으로써 초기 광학적 위상을 $\phi=(2n+1/2)\pi$ 또는 $\phi=(2n+3/2)\pi$ 로 설정하여 보다 넓은 동적 감지 범위를 얻을 수 있을 것이다. 시스템의 수학적 모델은 실험으로 구한 주파수 응답함수를 통해 구하였고 다중 모드 제어를 위해 LQG 제어를 설계하였다. 설계된 제어기의 성능은 주파수 영역과 시간 영역 실험을 통해 고찰하였다.

실험 결과를 통해 EFPI 센서와 PZT 작동기를 사용하여 세 모드의 진동이 성공적으로 저감됨을 살펴볼 수 있었다. 주파수 영역에서 세 모드의 진동이 15dB 이상 저감되었다. 광섬유 센서는 건전성 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 필터를 사용할 경우 좋지 않은 영향을 방지 하기 위해서는 필터의 구조 설계에 유의하여야 할 것이다.

후기

본 연구는 2000년도 과학기술부의 국가지정 연구실 사업에 의해 수행된 연구 결과의 일부이며, 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

- (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) 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
- (8) 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
- (9) 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
- (10) Dorato, P., Abdallah, C., and Cerone, V., 1995, *Linear Quadratic Control*, Prentice Hall, New Jersey