

신경망 제어를 이용한 광섬유가 부착된 복합재 보의 진동제어

김도형*, 양승만*, 한재홍**, 김대현*, 이 인***, 김천곤***, 홍창선***

Neuro-Adaptive Vibration Control of a Composite Beam with Optical Fiber Sensor

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

Key Words : Neural-Network Controller(신경망 제어기), EFPI(외부 페브리-페로 간섭계)

ABSTRACT

Experimental studies on vibration control of a composite beam with a piezoelectric actuator and an extrinsic Fabry-Perot interferometer (EFPI) have been performed using a neural network controller and an LQG controller. Vibration control performance was investigated in the nonlinear sensing range according to the vibration amplitudes. Using a neuro-controller, adaptive vibration control experiment has been performed for the structure with frequency variations, and its performance is compared with that of an LQG controller. The vibration control results show that the neuro-controller has good performance and robustness with respect to the system parameter variations.

1. 서론

구조물의 진동 제어를 위하여 지능 재료(smart materials)를 이용하는 연구는 꾸준히 증가하고 있고, 이러한 기능들을 실현하기 위해서 기능성 재료와 지능 구조물들의 특성에 대한 많은 연구가 이루어졌다.^(1,2) 구조물의 변형을 측정하기 위해 감지기로 사용되는 재료 중 광섬유는 재질이 유리섬유이므로 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. 또

한 광섬유 센서는 변형률, 온도 등의 여러 물리량을 동시에 측정 가능한 장점이 있다.

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⁽³⁾, 층간 분리된 복합재 보에 대한 좌굴의 발생과 층간 분리로 인한 파손의 감지⁽⁴⁾, 충격 위치 검출 등의 구조물의 건전성 모니터링에 대한 많은 연구들이 수행되었다. 또한 진동 제어를 위해 광섬유 센서를 사용한 연구사례를 찾아볼 수 있는데,^(5,6) 대부분의 연구는 단일 모드 제어에 대한 내용을 다루고 있다.

간섭을 이용한 광섬유 센서의 경우 출력 광 강도는 보강 간섭과 상쇄 간섭이 주기적으로 나타나므로, 큰 진폭의 진동을 측정할 경우 일반적인 선형 센서를 사용하는 경우와 달리 변형의 방향과 크기에 대한 정확한 정보를 얻기 힘들다. 이러한

* 한국과학기술원 항공우주공학전공 대학원

** 한국전자통신연구원

*** 한국과학기술원 항공우주공학전공

취약점을 보완하기 위하여 절대 변형 외부 페브리 페로 간섭계(AEFPI)를⁽⁷⁾ 이용하거나, 신호처리를 통한 변형의 크기와 방향을 계산하는 연구들이 수행 되었으나⁽⁸⁾ 인장과 압축을 반복하는 주기가 긴, 변화가 느린 시스템에 대한 연구들이 대부분이다. 본 연구에서는 추가적인 신호처리를 하지 않은 상태의 광섬유 간섭 센서의 신호를 사용하여 진동을 저감 하고자 한다. 진폭이 큰 진동을 측정할 경우 간섭 신호의 왜곡이 발생할 수 있고, 이러한 비선형 구간에서는 선형 제어기가 동적 시스템을 불안정하게 만들 수도 있으므로, 적응 제어기의 일종인 신경망 제어기를 사용하였다. 신경망 제어기는 일반적으로 비선형성에도 잘 적응 한다는 장점을 가지고 있다. Youn 등은⁽⁹⁾ 압전 작동기가 구조물과 층간 분리되는 상태를 고려한 적응 진동 제어를 수행 하였고, 양승만 등은⁽¹⁰⁾ 다중 모드의 진동 제어에 신경망 제어기를 적용하였다. 본 연구에서는 센서의 비선형 구간에서의 진동 제어와 시스템 특성 변화가 생긴 상태에서의 진동 제어를 위해 신경망 제어기와 LQG(Linear Quadratic Gaussian) 제어기를 사용하여 실험을 통해 성능을 고찰 하였다.

2. 시편 제작

광 강도의 왜곡 현상이 잘 나타날 수 있도록 Fig. 1 과 같은 시편을 준비 하였다. 주 구조물은 Graphite/Epoxy [90/0]s 이고, 시편의 끝단에는 1.6 g의 집중 질량을 추가하여 유연한 구조물을 구성하였다. 본 연구에서는 첫 번째 굽힘 모드를 제어 대상으로 선정하여 스트레인의 감지와 작동이 쉬운 고정단에 가깝게 한쪽 면은 압전 세라믹(C-8, Fuji Ceramics), 다른 쪽은 EFPI 센서를 부착하였다. 진동 신호의 비교를 위해 끝 단으로부터 40 mm 떨어진 지점에서 레이저 변위계를 이용하여 변위 신호를 측정하도록 하였다. EFPI 센서의 구조는 Fig. 2 와 같다. 제작된 EFPI 센서는 게이지길이 $L = 5.1$ mm, 공기층의 거리 $s = 15$ μ m이다. 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 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)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.

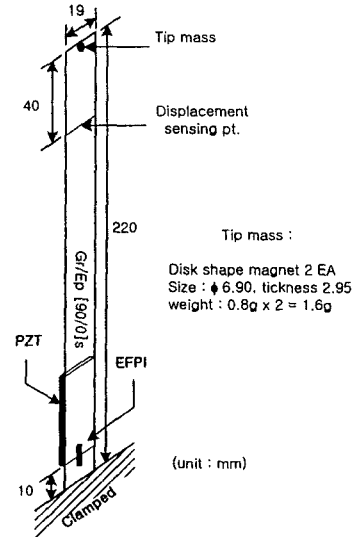


Fig. 1 Schematic diagram of the specimen.

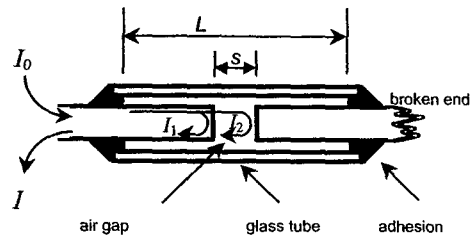


Fig. 2 Schematic Diagram of EFPI.

3. 제어기 설계

3.1 신경 회로망

신경회로망은 경험과 학습을 통한 사람의 인지 또는 지식 습득 과정을 모방하여 인공적으로 구현한 수학적 모델로, 사람의 신경 세포를 하나의 인공 뉴런으로 모델링한 구조이다. 각각의 뉴런(neuron)은 편차(bias)와 연결강도(weight)와 같은 정해진 매개변수를 갖고 전달 함수를 통해 간단한 수치적 연산을 수행하여 출력값이 계산된다. 이러한 뉴런들을 연결하여 신경망을 구성한다.⁽¹⁰⁾

신경망 제어기의 구조는 Fig. 3 과 같다. 신경망 제어기로부터 계산된 제어력은 신경망 모델의 입력으로 작용하여 그 제어력에 의한 모델의 출력을

예측한다. 실제 출력값과 비교하여 신경망 모델의 매개변수를 학습시키고, 제어기의 매개변수는 모델의 출력이 0 이 되도록 학습시킨다. 본 연구에서는 모멘텀(momentum)이 포함된 오차 역전파 학습 방법을 사용 하였다.

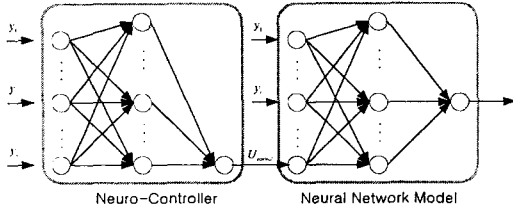


Fig. 3 Connection of neural network model and neuro-controller.

3.2 LQG 제어기

신경망 제어기와와의 성능 비교를 위하여 최적제어기를 설계하였다. 신경망 제어기의 경우 적응제어기로 시스템에 대한 수학적 모델이 필요하지 않지만, LQG 제어기를 설계하기 위해서는 동적 시스템의 수학적 모델이 필요하다. 본 연구에서는 랜덤 가진에 의한 주파수 응답함수를 이용한 시스템 식별을 통해 모델을 구하고, 이를 기초로 LQG 제어기를 설계하였다.

4. 진동 제어 실험

진동 제어는 두 가지 관점에서 수행 되었다. 우선 미소 변형에서의 랜덤 가진에 의한 주파수 응답과 EFPI 센서의 왜곡이 발생하는 큰 진폭의 진동에 대해 조화 가진의 외력이 작용하는 조건에서의 진동 제어 실험을 수행 하였다.

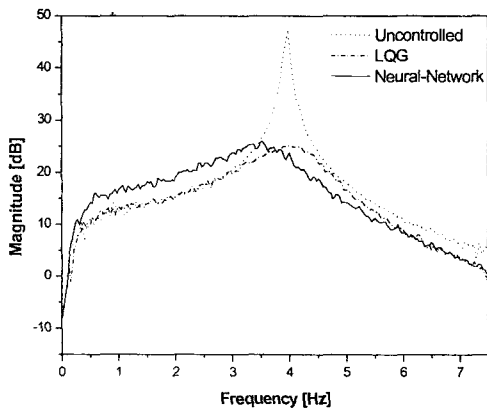


Fig. 4 Frequency responses of the uncontrolled and controlled systems (nominal system).

그리고, Fig. 1 에 나타난 원래의 시스템(nominal system)을 기준으로 설계한 제어기가 시스템의 변화에 적응하는 정도를 살펴보기 위해서 끝단의 집중 질량을 제거한 시스템(perturbed system)에 대한 제어 성능을 살펴 보았다.

가진 신호와 제어 신호는 고전압 앰프를 통해 증폭되어 압전 세라믹에 부가된다. 제어기는 DSP 보드를 이용하여 구현하였고, 1 kHz 로 동작하도록 프로그래밍 하였다. 랜덤 가진에 의한 주파수 응답 함수를 구하는 실험에서는 HP3567A FFT Analyzer 를 사용하였다.

미소 변위의 랜덤 가진에 대한 주파수 응답 함수를 Fig. 4 에 도식하였다. 이 경우는 EFPI 센서 신호가 선형적인 특성을 나타내는 구간으로 두 가지 제어기 모두 우수한 성능을 나타낸다.

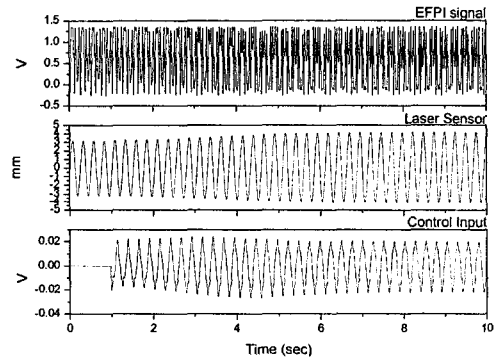


Fig. 5 LQG controlled result (nominal system).

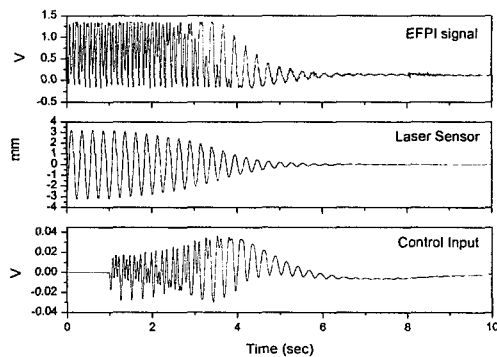


Fig. 6 NN controlled result (nominal system).

Fig. 5 와 6 은 외팔보의 첫 번째 공진 주파수인 3.97 Hz 로 조화 가진한 경우의 제어결과를 나타낸다. 시편이 충분히 가진된 후 가진력은 제거하고 제어기를 작동시킨 실험 결과이다. 그림에서 1 초에 제어가 시작되고, 제어력은 고전압 앰프를 거치기 전의 신호를 나타낸다. 가진력이 작은 경우,

즉 EFPI 센서의 신호 왜곡이 심하지 않은 경우에는 두 제어기 모두 우수한 성능을 나타내지만 신호의 왜곡이 심한 경우에는 LQG 제어기를 사용한 결과에서 진동이 줄어들지 않고 오히려 시스템이 불안정하게 되는 현상이 발생하였다. 신호의 왜곡이 아주 심한 경우에는 두 가지 제어기 모두 시스템을 불안정하게 만들 수 있지만, 신경망 제어기를 사용할 경우 LQG 제어기에 비해 보다 넓은 신호 왜곡의 범위에서도 시스템을 안정화시킬 수 있음을 확인할 수 있었다.

다음으로 끝단 질량을 제거한 시스템에 대해서 동일한 실험을 수행 하였다. 제어기는 원래의 시스템에 사용한 것과 동일한 제어기를 사용하였다. 변형된 시스템은 공진 주파수가 증가 하였고(3.97 Hz → 7.09 Hz), 이에 따라 미소 진동에서의 랜덤 가진에 대한 주파수 응답 실험에서 LQG 제어기의 경우 제어 성능의 급격한 저하가 발생 하였다.

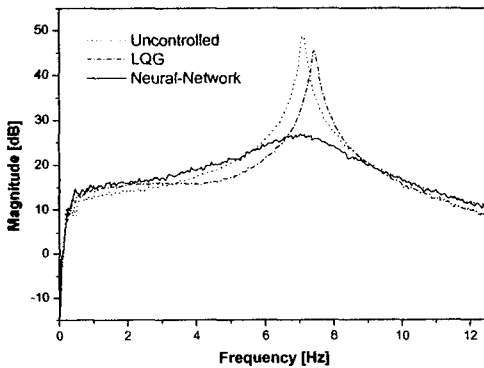


Fig. 7 Frequency responses of the uncontrolled and controlled systems (perturbed system).

시간 영역에서의 조화 가진에 대한 실험에서는 가진력만 제거하고 자유 감쇠 시킨 실험 결과와 LQG 제어기를 작동 시킨 경우는 유사하고, 신경망 제어기를 작동 시킨 경우에는는 잔류 진동이 보다 빨리 소산 됨을 살펴볼 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 비선형 특성을 가진 EFPI 센서를 사용한 진동 제어 실험을 수행 하였다. 또한 시스템의 특성 변화에 대한 적응성을 신경망 제어기와 LQG 제어기를 사용하여 살펴 보았다. 선형 제어기인 LQG 제어기에 비해 신경망 제어기가 센서의 비선형성과 고유 진동수 변화에 대한 좋은 적응성을 나타내었다.

후 기

본 연구는 2000 년도 과학기술부 국가지정연구 실사업(2000-N-NL-01-C-250)의 지원으로 수행된 연구결과의 일부이며, 지원에 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) 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.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (6) 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.
- (7) 강현규, 박중완, 류치영, 홍창선, 김천곤, 전승문, 2001, "광섬유 AEFPI 센서를 이용한 구조물의 동적 변형률 측정," 한국항공우주학회지, 제 29 권, 제 1 호, pp.39~45.
- (8) Kim, S. H., Lee, J. J., and Kwon, D. S., 2001, "Signal processing algorithm for transmission-type Fabry-Perot interferometric optical fiber sensor," *Smart Materials and Structures*, Vol. 10, pp. 736~742.
- (9) Youn S.H., Han, J.H., and Lee, I., 2000, "Neuro-Adaptive Vibration Control of Composite Beams Subject to Sudden Delamination", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 238, No. 2, pp. 215~231.
- (10) 양승만, 류근호, 윤세현, 이인, 2001, "신경망 제어기를 이용한 복합재 보의 다중 모드 적응 진동 제어," 한국복합재료학회지, 제 14 권, 제 1 호, pp. 39~ 46.