論文

신경망 제어기를 이용한 복합재 보의 다중 모드 적응 진동 제어

양승만* · 류근호* · 윤세현** · 이 인***

Adaptive Multi-mode Vibration Control of Composite Beams Using Neuro-Controller

Seung-Man Yang*, Keun-Ho Rew*, Se-Hyun Youn**, and In Lee***

ABSTRACT

Experimental studies on the adaptive multi-mode vibration control of composite beams have been performed using neuro-controller. Neuro-controllers require too much computational burden, which blocks wide real-time applications of neuro-controllers. Therefore, in this paper, an adaptive notch filter is proposed to separate a vibration signal into each modal vibration signal. Two neuro-controllers with fewer weights are connected to the corresponding modal signals to generate proper modal control forces. The vibration controls using the adaptive notch filter and neuro-controllers have been performed for two specimens, specimen A and B, which have different natural frequencies because of different positions of tip masses. Significant vibration reduction has been observed in both cases. The vibration control results show that the present neuro-controller has good adaptiveness under the system parameter variations.

초 록

본 논문에서는 신경망 제어기를 이용하여 복합재 보의 적응 다중 모드 진동 제어에 관한 실험적 연구를 수행하였다. 신경망 제어기는 계산량이 많기 때문에 실시간 적용에 어려움이 따른다. 본 논문에서는 진동 신호를 모드별로 분리하기 위한 적응 노치 필터를 제안하였다. 연결 강도의 개수가 적어서 계산량이 적은 두 개의 신경망 제어기를 이용하여 각 모드의 제어력을 계산하였다. 끝단 질량의 위치의 차이로 인해 고유 진동수가 다른 두 시편 A, B에 대해서 적응 노치 필터와 신경망 제어기를 이용한 적응 진동 제어를 수행한 결과, 두 경우 모두 효과적으로 진동 제어가 이루어졌다. 이러한 결과로 시스템 파라미터의 변화에 대한 신경망 제어기의 적응 진동 제어 성능을 확인할 수 있다.

1. 서 론

구조물의 진동을 제어하는 방법은 외부로부터 에너지가 공급되는지의 여부에 따라 크게 수동 제어(passive control)[1-2]와 능동 제어(active control)[3-4]로 구분된다. 특히 최근에는 구조물에 감지기(sensor) 및 작동기(actuator)를 부착 또는 삽입하여 구조물 자체가 마치 하나의 두뇌계와 신경계 및 근육계를 형성하여 예상치 못한 외란에도 안정성을 유지하려는 지능 구조물(smart structures)에 대한 연구가 활발히 이루어

*한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학 전공
**항공우주연구소 연구원
***한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학 전공, 교신저자(E-mail: inlee@asdl.kaist.ac.kr)

지고 있다[5].

일반적으로 구조물은 시간이 지남에 따라 여러 가지 요인에 의하여 그 특성이 변하게 된다. 이때 기존의 선형 시불변 제어 알고리즘을 이용하여 진동 제어를 수행하는 경우, 효과적인 제어가 이루어지지 않을 뿐 아니라 오히려 선형 제어기가 그 진동을 더욱 진전시키게 되어 구조물의 불안정성을 촉진시킬 수도 있다. 따라서 시스템의 변화가 생길 때, 계속되는 구조물의 파손을 억제하기 위해 적응(adaptive) 제어 알고리즘이 필요하다.

신경망 제어기는 일반적으로 비선형성에도 잘 적응한다는 장점을 가지고 있으나, 학습 과정에서 제어기의 계산량이 너무 많아 실시간으로 다중 모드의 진동 제어에 적용하기 힘들다. 따라서 신경망 제어기를 이용한 다중 모드 제어를 수행하기 위해서는 무엇보다도 계산량을 줄이는 연구가 필요하다. 윤세현[6]은 신경망 제어기를 이용하여 복합재 보의 단일 모드 진동 제어를 실시간으로 수행하였고, Rajendra[7]는 신경망 칩(neuro-chip)을 이용하여 학습시간을 단축시키는 연구를 수행하였다. 그러나 아직까지 계산 속도의 한계로 다중 모드 진동 제어에 관련된 연구는 부족하다고 할 수 있다. 본 연구에서는 신호처리를 통하여 진동 신호를 모드별로 분리한 뒤, 각 모드에 계산량이 적은 단일 모드 신경망 제어기를 연결하여 진동 제어를 수행하는 방법을 고려하였다. 모달 신호를 분리하여 각각 제어할 경우 신경망 제어기의 연결 강도(weight)의 수를 줄여 계산량을 줄이는 장점이 있다.

2. 본 론

2.1 주파수 추정 및 신호 분리 이론

감지기로부터 진동 신호를 모드별로 분리하는 방법은 다음과 같다. AR(auto-regressive) 모델을 이용하여 회귀 최소 자승법(recursive least square)으로 특성 방정식(characteristic equation)의 계수를 추정하고, 베어스토우(bairstow) 방법을 이용하여 특성 방정식으로부터 근을 구한 후, 그 근들을 이용하여 시스템의 고유 진동수를 추정한다[8,9]. 그리고 노치 필터(notch filter)를 이용하여 원래의 신호에서 고유 진동수의 성분들을 분리하여 각 모드의 진동 신호에 신경망 제어기를 적용하여 제어력을 계산하게 된다.

일반적인 시스템의 이산화된 전달 함수는 식 (1)과 같이 나타내어진다. 주파수 추정을 위해 사용되는 AR 모델은 식(1)에서 분모항만을 고려한다. AR모델의 계수 $\alpha_1, \alpha_2, \cdots, \alpha_{2p}$는 회귀 최소 자승법으로 구할 수 있다.

$$H(z^{-1}) = \frac{1+b_1 z^{-1}+\cdots+b_q z^{-q}}{1+\alpha_1 z^{-1}+\alpha_2 z^{-2}+\cdots+\alpha_{2p} z^{-2p}} \qquad (1)$$

베어스토우법은 $2p$차의 다항식으로 이루어진 고차방정식을 2차의 방정식들의 p개의 곱으로 간주한 후, 급수 전개를 이용하여 2차 방정식의 계수들을 반복적으로 구하는 수치적 방법이다. 다른 수치해석 방법과 비교할 경우의 장점으로는 초월함수의 계산이 없고, 복소수계산이 들어가지 않으므로 계산량이 적고, 초기 추정값에 덜 민감하여 강건하게 수렴한다.

베어스토우 방법을 이용하여 AR모델의 특성 방정식을 2차 방정식으로 변환하면 각 2차 방정식은 근의 공식을 이용하여 근을 구할 수 있다. 그리고 각 모드의 감쇠 고유 진동수(damped natural frequency)인 $\omega_i(n)$는 식(2)와 같이 각 근들의 위상을 채집 시간으로 나누어 구한다.

$$\omega_i(n) \cdot T_{samp} = \angle(z_i | A(z_i) = 0),\ i=1, 2, \cdots, p \qquad (2)$$

여기서 $A(z_i)$는 식(1)에서 분모 항을 의미한다. 그리고 T_{samp}는 채집 시간(sampling time)을 의미한다.

진동 신호의 고유 진동수를 추정하면 식(3)과 같은 노치 필터 전달 함수를 이용하여 모달 신호를 분리하게 된다. 실제 진동 신호로부터 노치 필터를 거친 신호를 제거하면 일정 주파수 성분의 신호만을 얻을 수 있다.

$$H_i(s) = \frac{s^2+\omega_i^2}{s^2+2\zeta+\omega_i s+\omega_i^2}, \quad i=1, 2, \cdots, p \qquad (3)$$

이러한 신호처리 방법을 이용하여 구조물의 고유 진동수들을 실시간으로 추정하면 고유 진동수의 변화를 이용하여 구조물의 실시간 안전 진단에 적용할 수도 있고, 추정된 고유 진동수들을 이용하여 적응 제어를 수행할 수도 있는 장점이 있다.

2.2 신경 회로망

신경 회로망(이하 신경망)은 경험과 학습을 통한 사

람의 인지 또는 지식 습득 과정을 모방해 인공적으로 구현한 인간의 신경망에 대한 하나의 모델로, 사람의 신경 세포를 하나의 인공 뉴런으로 모델링한 구조이다. 각각의 뉴런(neuron)은 편차(bias)와 연결강도(weight)와 같은 정해진 매개변수를 갖고 전달 함수(transfer function)를 통해 간단한 수치적 연산을 수행하여 출력값이 계산된다. 이렇게 만들어진 인공 뉴런은 신경망의 기본 구성 요소가 되는데 이러한 뉴런들을 연결하여 신경망을 구성한다.

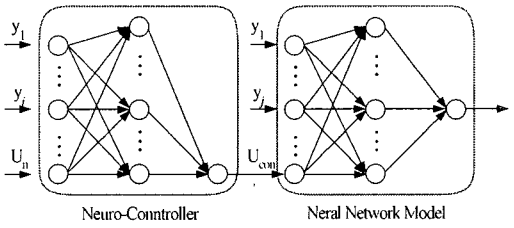


Fig. 1 Connection of neural network model and neuro-controller for single mode control.

Fig. 1은 단일 모드 제어기의 구조를 나타내고 있다. 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 0이 되도록 학습시킨다. 본 연구에서는 모멘텀(momentum)이 포함된 오차 역전파(back-propagation) 학습 방법을 사용하였다.

3. 실험 방법 및 결과

신경망 제어기를 이용하여 적응 진동 제어 실험을 수행하기 위하여 Fig. 2와 같은 복합재 시편을 준비하였다. 실험에 사용된 시편은 (주)한국 화이바의 CU-125 NS 그래파이트/에폭시(graphite/epoxy) 프리프레그(prepreg)를 적층한 후 성형하였다. 두 시편의 동적 특성을 파악하기 위한 실험을 수행하였다. 이때 감지기로는 KEYENCE 사의 LB-041, LB-1001 레이저 변위 감지기를 사용하였고, 압전 세라믹을 통하여 가진하였다. 그리고 고전압 증폭기는 MATSUSADA사의 제품으로 500배의 배율을 갖는다. 시편의 주파수 응답을 구하기 위해 HP3567A FFT Analyzer를 이용하였고, Star Modal System®을 사용하여 주파수 응답 함수를 커브 핏팅하였다. Fig. 3은 0.1 volt의 크기로 0 Hz에서 25 Hz까지 랜덤(random) 가진한 경우의 주파수 응답 함수를 구한 결과이다. 시편 A와 B는 끝단 질량의 위치가 다르기 때문에 고유 진동수가 다른 것을 알 수 있다.

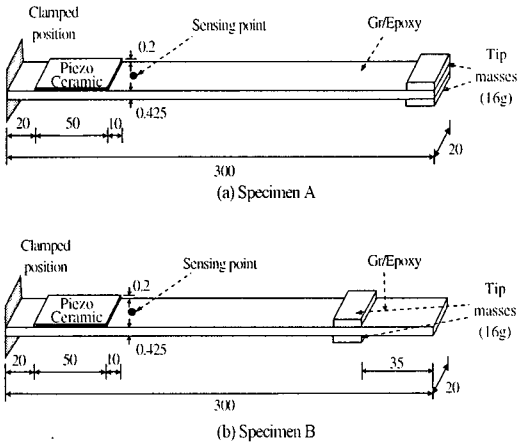


Fig. 2 Geometry of $[90/0]_s$ composite beam with piezo ceramic and added tip masses (unit:mm).

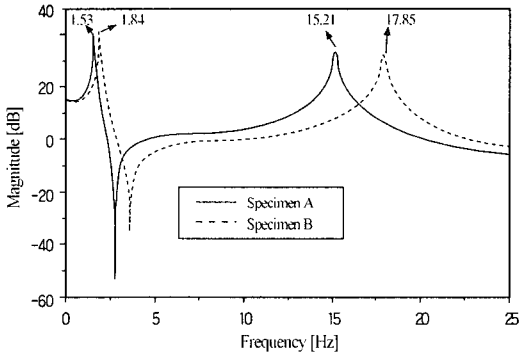


Fig. 3 FRF for $[90/0]_s$ composite specimens with added masses.

3.1 주파수 추정 및 신호 분리

신경망 제어기를 이용하여 다중 모드 적응 제어 실험을 수행하기 앞서 본 연구에서 제안한 적응 노치 필터의 성능을 검증하기 위하여 시간에 따라 특성이 바

꿔는 시변(time-varying) 시스템에 적용하였다. 식(4)와 같이 두 개의 정현파와 잡음이 섞인 신호를 진동 신호라고 가정하였다.

$$x(t) = U_1 \sin(2\pi f_1) + U_2 \sin(2\pi f_2) + N(t) \qquad (4)$$

여기서 f_1과 f_2는 진동 신호의 고유 진동수를 의미하며 U_1과 U_2는 각 정현파의 최대 크기를 의미하며 1.69와 1.125의 값을 갖는다. 그리고 $N(t)$는 백색 잡음을 의미하며 최대 크기는 0.1로 하였다. 고유 특성의 변화를 주기 위해서 15초 후부터 고유 진동수가 증가하도록 하였다. 첫 번째 모드의 경우 1 *Hz*에서 2 *Hz*로 바뀌게 되고 두 번째 모드의 경우는 16 *Hz*에서 20 *Hz*로 바뀌게 된다.

시스템 파라미터를 추정하는 회귀 최소 자승법에서 망각 계수는 0.9의 값을 사용하였다. 베어스토우 방법에서 최대 반복 횟수는 30번으로 하였고, 채집 시간은 0.02초로 수행하였다.

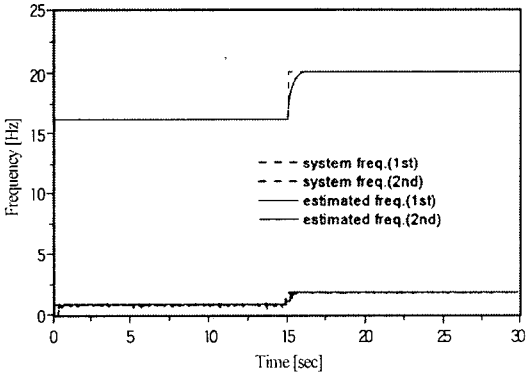
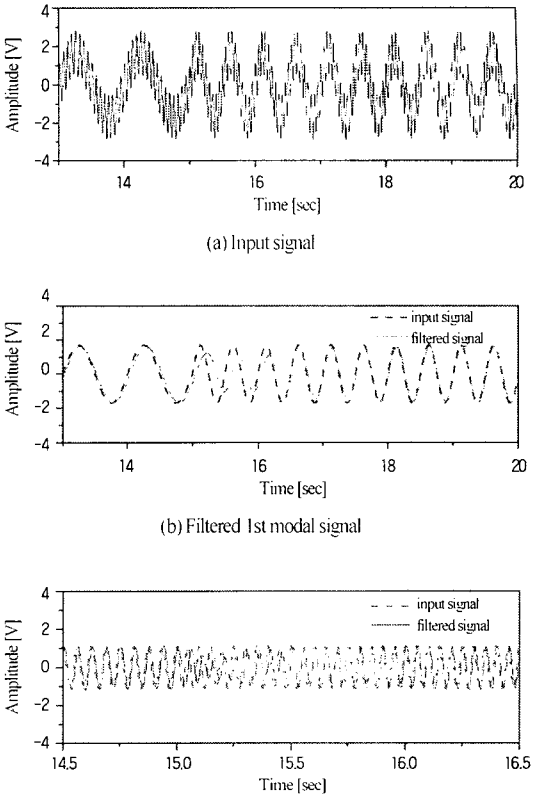


Fig. 4 Frequency estimation using adaptive notch filter.

Fig. 4는 시간에 따라 추정한 진동수를 시스템의 고유 진동수와 비교하여 나타내었다. 시작 후 약 1초 후부터는 정확한 값을 예측하고 있으며 고유 진동수가 변하는 15초 부터에서도 크게 벗어나지 않고 정확한 값을 추정하고 있다. Fig. 5는 필터의 입력 신호와 필터를 통과한 출력 신호이며, 특성이 변하는 15초를 전후하여 나타내었다. 갑작스런 고유 진동수의 변화에 추정한 주파수의 오차에 의해 잠시 왜곡된 신호가 나오지만, 곧 정확한 신호를 분리하고 있음을 확인하였다.



(a) Input signal

(b) Filtered 1st modal signal

(c) Filtered 2nd modal signal

Fig. 5 Input and filtered signals of time- varying system.

3.2 다중 모드 진동 제어 실험

신경망 제어기의 단점인 많은 계산량을 극복하여 실시간으로 다중 모드 진동 제어를 수행하기 위해서 적응 노치 필터를 이용하여 진동 신호를 모드별 신호로 분리한 후 각각의 모드별로 계산량이 적은 신경망 제어기를 적용하여 진동 제어를 수행하였다.

시스템 파라미터를 추정하는 회귀 최소 자승법에서 망각 계수는 잡음에 대해 강건하도록 비교적 높은 값인 0.998을 사용하였고, 채집 시간은 0.02초로 수행하였다. 그리고 베어스토우 방법에서는 최대 반복 횟수를 20번으로 하였으며, 채집 시간은 0.02초로 하였다. 사용한 신경망 제어기의 구조를 살펴보면 모델과 제어기 부분에 입력층에는 5개의 뉴런을, 그리고 은닉층에는 8개의 뉴런으로 구성하였다. 신경망에서 전달함수로는 은닉층에서는 탄젠트 시그모이드(tangent sigmoid)함수

를, 출력층에서는 선형 함수를 사용하였다. 제어기의 채집 시간은 첫 번째 모드에 적용한 제어기는 0.05초로, 두 번째 모드에 적용한 제어기는 0.01초로 수행하였다. 각 모드에 사용된 신경망 모델과 제어기의 파라미터들은 Table 1과 Table 2에 정리하였다.

Table. 1 Parameters for 1st mode neuro-controller.

	NN model	NN controller
Learning rate	0.1	0.05
Momentum coefficient	0.99	0.99
Initial weight value	-0.3	0.3
No. of maximum repetition	6	6
No. of input layer' s neuron	5	5
No. of hidden layer' s neuron	8	8

Table. 2 Parameters for 2nd mode neuro-controller.

	NN model	NN controller
Learning rate	0.1	0.05
Momentum coefficient	0.95	0.90
Initial weight value	-0.3	0.3
No. of maximum repetition	6	10
No. of input layer' s neuron	5	5
No. of hidden layer' s neuron	8	8

신경망 제어기를 이용한 다중 모드 적응 진동 제어 실험의 개략도는 Fig. 6과 같다. 여기서 두 개의 함수 발생기로부터 식(5)와 같이 복합재보의 고유 진동수와 같은 진동수의 정현파를 발생시켜 압전 세라믹을 통해 가진한다.

$$u_{cmd} = 5\sin(\omega_1 t) + 20\sin(\omega_2 t)\ [V] \qquad (5)$$

레이저 변위계를 통해 감지된 진동 신호는 DSP보드로 입력되어 신호 분리 및 제어력 계산을 수행한다. 이때 사용되는 DSP 보드는 dSPACE 사의 DS1102 DSP보드이다. DS1102는 Texas Instrument 사의 TMS320C31 DSP 칩을 기본으로 각각 4개의 아날로그/디지털, 디지털/아날로그 변환기를 내장하고 있다. 제어력이 계산되면 가진력과 제어력을 합하여 고전압 증폭기를 거쳐 세라믹에 전달된다.

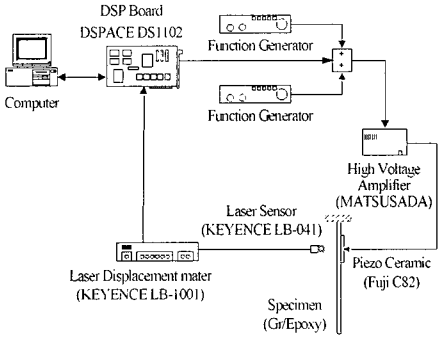


Fig. 6 Experimental setup for real-time multi-mode vibration control using neural network.

Fig. 7~10은 두개의 신경망 제어기를 이용하여 진동 제어를 수행한 결과이다. 각각의 시편에 식(5)와 같이 0초부터 40초까지 각 시편의 첫 번째, 두 번째 고유 진동수로 동시에 가진하였다. Fig. 7은 시편 A에 대한 실시간 다중 모드 진동 제어 실험 결과로, 12초부터 신경망 제어기를 학습시켜 제어하였다. Fig. 7(a)는 레이저 변위계로 부터 측정된 진동 신호이고, Fig 7(b)와 (c)는 적응 노치 필터를 이용하여 분리한 진동 신호이다. 제어가 시작되면 신경망 제어기가 학습이 이루어지는 3~4초가 지나 학습이 완료된 시점부터는 효과적으로 두 모드의 진동을 억제하고 있다. Fig. 8에서 각 모드별로 계산된 제어력을 나타내었다. Fig. 9와 10은 시편 B에 적용한 결과로 이 경우에도 시편 A와 같은 조건의 신경망 제어기를 사용하였으며, 12초부터 신경망 제어기를 학습시켜 제어를 수행하였다. 시편 B의 경우에도 신경망 제어기의 학습이 이루어진 3~4초 이후부터는 효과적으로 진동 제어를 수행하고 있음을 확인할 수 있다. 같은 조건의 제어기의 상태에서 시편의 동적 특성이 달라졌음에도 불구하고 뛰어난 제어 성능을 보인다.

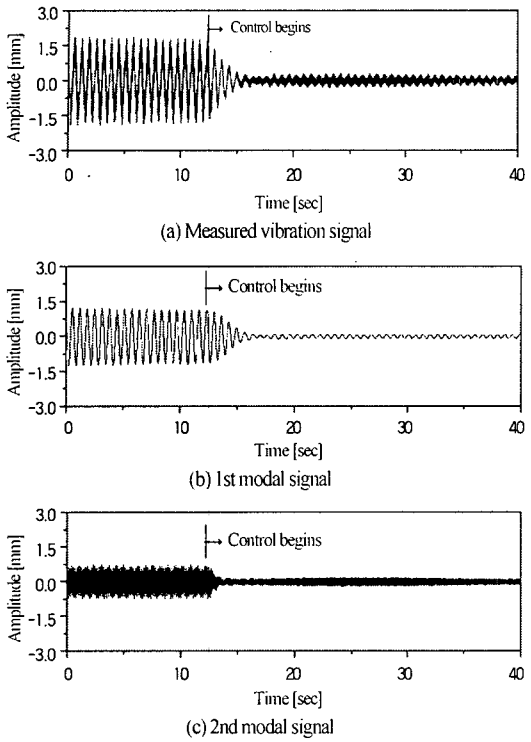


Fig. 7 Multi-mode vibration control results for specimen A under persistent disturbance.

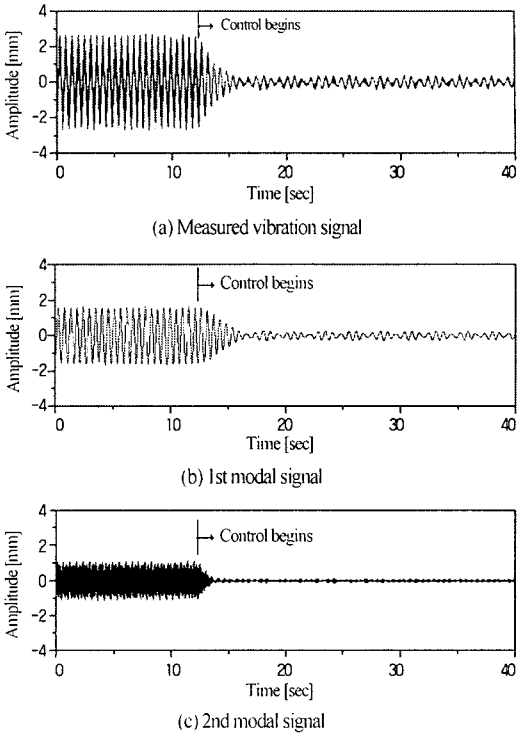


Fig. 9 Multi-mode vibration control results for specimen B under persistent disturbance.

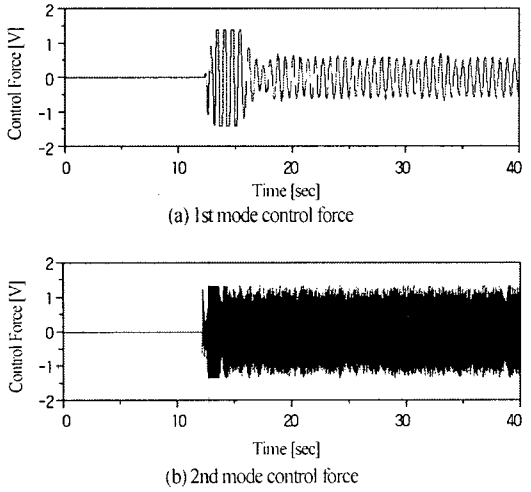


Fig. 8 Control forces for specimen A under persistent disturbance.

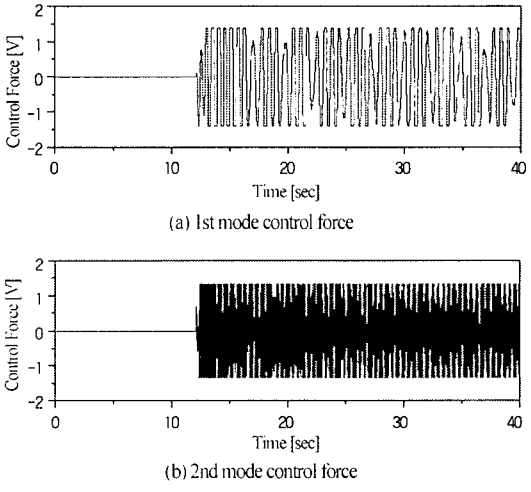


Fig. 10 Control forces for specimen B under persistent disturbance.

마지막으로 적응 진동 제어를 수행하였다. 여기서 제어 도중에 시편의 동적 특성을 변화시키는 것이 어렵기 때문에 우선 한 시편에 대해 어느 정도 제어를 수행하며 신경망 제어기와 모델을 학습시킨 후, 신경망 제어기와 모델에 사용된 매개변수들을 저장한다. 그 후, 다른 시편으로 교체하여 저장된 매개변수들을 새로운 제어기와 모델의 초기값으로 사용하여 적응 진동 제어를 수행하였다.

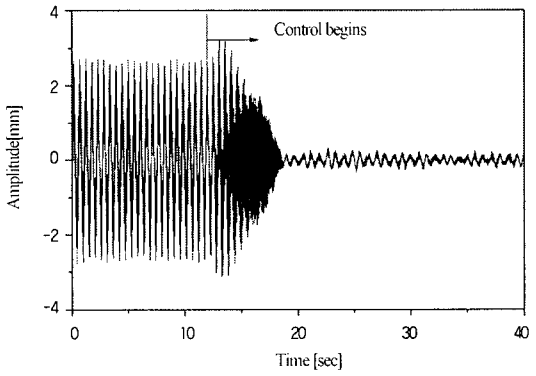


Fig. 11 Adaptive vibration control result when specimen A changes to B under persistent disturbance.

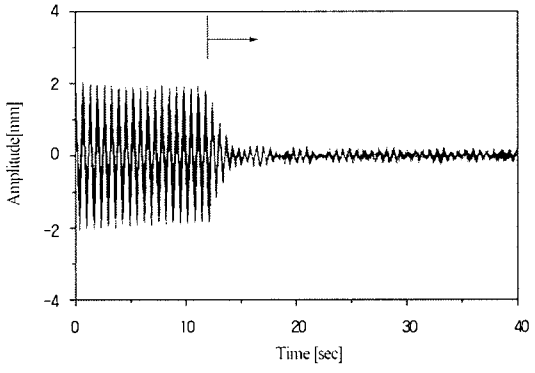


Fig. 12 Adaptive vibration control result when specimen B changes to A under persistent disturbance.

Fig. 11은 시편 A를 이용하여 신경망 제어기를 학습시켜 매개변수들을 저장한 후, 시편 B로 교체하여 저장된 매개변수를 초기값으로 이용하여 12초부터 제어를 수행한 결과이다. 처음에는 진폭이 약간 증가하는 것을 볼 수 있으나, 신경망 제어기가 적응 가정을 거치면 효과적으로 제어가 수행된다. 이 때 진폭이 잠시 증가하는 것은 신경망 모델이 다른 시편에 학습이 되어있어 신경망 제어기에서 부정확한 정보를 이용하여 제어력을 계산했기 때문이다. 그러나 시간이 지나 신경망 모델과 제어기가 새로운 시편 B에 대해 학습이 이루어지면 제어가 효과적으로 이루어진다. Fig. 12는 시편 B를 이용하여 사전에 학습을 시킨 뒤, 매개변수를 이용하여 시편 A를 제어한 결과이다. 이 경우도 마찬가지로 처음에는 미소하게 진폭이 증가하다가 신경망 모델과 제어기가 바뀐 시편에 대해 학습이 이루어지면 좋은 제어 성능을 보이고 있다.

Ⅳ. 결 론

본 논문에서는 시간에 따라 동적 특성이 변하는 시스템에 대해서 적응 노치 필터와 신경망 제어기를 이용하여 적응 진동 제어 실험을 수행하였다. 특히 신호 분리를 통한 모드별 제어 방법을 도입하여 실시간 실험이 가능하도록 계산량을 줄일 수 있었다.

끝단 질량의 위치의 차이에 의해 고유 진동수가 각기 다른 두 시편에 대해서 신경망 제어기를 이용하여 두 모드 진동 제어를 성공적으로 수행하였으며, 시편의 동적 특성이 변하는 경우에 대한 적응 진동 제어 실험도 성공적으로 수행하였다.

후 기

본 연구는 2000년도 과학기술부의 국가지정연구실(National Research Lab.) 사업 지원에 의해 수행된 연구 결과의 일부이며, 지원에 감사 드립니다.

참고문헌

(1) 양승만, 김도형, 한재흥, 이인, "외부 회로가 연결된 압전 세라믹을 이용한 복합재 보의 수동 감쇠 개선," 한국복합재료학회지, 제12권, 제2호, 1999, pp. 1-9.

(2) 조기대, 한재흥, 이인, "점탄성 재료로 구속 감쇠 처리된 복합 적층판의 진동 및 감쇠 해석," 한국복합재료학회지, 제11권, 제 5호, 1998, pp. 38-47.

(3) Bailey, T. and Hubbard Jr., J. E., "Distributed Piezoelectric Polymer Active Vibration Control of a Cantilever Beam," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 8, No. 5, 1985, pp. 605-611.

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

(5) Rogers, C. A., Baker, D. A. and Jaeger, C. A., "Introduction to Smart Materials and Structures," *U.S. ARO Workshop on Smart Materials, and Mathematical Issues*, VPI & SU, Technomic Publishing Co., September, 1988.

(6) 윤세현, 신경망 제어기를 이용한 지능 복합재 구조물의 적응 진동 제어, 한국과학기술원 석사학위 논문, 1998.

(7) Damle, Rajendra and Rao, Vittal, "Neural network based optimizing controllers for smart structural systems," *Smart Materials and Structures*, Vol. 7, No. 1, 1998, pp. 23-30.

(8) 류근호, 이인, "복합재 구조물의 적응 진동제어 특성 및 응용," 한국복합재료학회 추계학술발표대회, 영남대학교, 1998년.

(9) Rew. K. H., Han. J. H. and Lee. I., "Adaptive Multi-modal Vibration Control of Wing-like Composite Structure Using Adaptive PPF," *the 41st AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, Atlanta, Georgia, April 2000.