

< 논 문 >

신경망 제어기를 이용한 지능 복합재 구조물의 적응 진동 제어

Adaptive Vibration Control of Smart Composite Structures Using Neuro-Controller

윤 세 현* · 한 재 흥** · 이 인***

Se-Hyun Youn, Jae-Hung Han and In Lee

(1998년 5월 2일 접수 : 1998년 9월 8일 심사완료)

Key Words : Neuro-Controller(신경망 제어기), Piezoelectric Material(압전 재료), Composite Structure(복합재 구조물), Adaptive Vibration Control(적응 진동 제어), Smart Structures(지능 구조물)

ABSTRACT

Experimental studies on the adaptive vibration control of composite beams have been performed using a piezoelectric actuator and the neuro-controller. The variations in natural frequencies of the specimen and the actuation characteristics of the piezoelectric actuator according to the delamination in the bonding layer have been studied. In addition, the simulation of adaptive vibration control has been performed for the composite specimens with delaminated piezoelectric actuator using neuro-controller. The hardware for the adaptive vibration control experiment was prepared. A DSP(digital signal processor) has been used as a digital controller. Using neuro-controller, the adaptive vibration control experiment has been performed. The vibration control results using the neuro-controller show that the present neuro-controller has good performance and robustness with the system parameter variations.

1. 서 론

최근 들어 항공 우주 및 여러 공학 분야에서 비강성과 비강도가 큰 복합재 구조물의 사용이 늘고있는데 이러한 경량화로 인한 구조물의 유연성 증가로 인해 외부 하중에 의한 진동이 증가하게 되고 구조물의 피로 파괴

를 유발시켜 구조물 자체의 안정성에도 큰 위협이 되기도 한다. 따라서 이러한 구조물의 진동을 효율적으로 제어하려는 여러 가지 방법이 논의되고 있다. 특히 최근에는 구조물에 감지기(sensor) 및 작동기(actuator)를 부착 또는 삽입하여 구조물 자체가 마치 하나의 두뇌계와 신경계 및 근육계를 형성하도록 해서 예상치 못한 외란에도 안정성을 유지하려는 지능 구조물에 대한 연구가 활발히 이루어 지고 있다⁽¹⁾. 지능 구조물에 사용되는 기능성 재료(functional material) 중 압전 재료(piezoelectric material)는 비교적 가격이 저렴하고 성능에 비해 크기가 작으며 무게가 가볍다는 장점이 있어

* 한국과학기술원 항공우주공학과 대학원

** 정회원, 한국과학기술원 항공우주공학과 연구원

*** 정회원, 한국과학기술원 항공우주공학과 교수

진동 제어 분야에 널리 응용되고 있는 추세이다^(2~4). 실생활에서 구조물은 반복하중이나 충격(impact)에 의한 층간 분리가 발생하는 경우⁽⁵⁾, 또는 우주 유연 구조물의 임무 수행을 위한 자세 변경 시 극심한 온도차에 의해 구조물 자체에 열변형이 발생하는 경우 등과 같이 시간에 따라 구조물 그 자체의 동특성 변화가 발생한다. 이와 같이 구조물의 동적 특성이 시간에 따라 변화하는 경우에 참고문헌 (3, 4)와 같이 기존의 선형 시불변(linear time invariant) 제어 알고리즘을 사용하여 진동 제어를 수행하면 효과적인 제어가 이루어지지 않을 뿐 아니라, 오히려 구조물의 파괴를 촉진시킬 우려가 있다. 그러므로 이러한 문제점을 방지하기 위해서는 시불변 제어 알고리즘의 한계를 뛰어넘는 적응 제어(adaptive control) 방식이 필요하게 된다. 본 논문에서는 적응 제어 알고리즘의 한 분야인 신경망 제어기(neuro-controller)를 이용하여 복합재 구조물의 적응 진동 제어를 수행하고자 한다.

신경망 제어기는 외부 환경이 불확실하거나 시스템이 비선형인 경우에도 좋은 제어 성능을 보이며, 신경망 학습에 사용되지 않은 데이터에 대한 내삽(interpolation) 기능을 가지고 있어 제어를 비롯한 여러 분야에 걸쳐 광범위하게 연구가 수행되고 있으나 진동 제어를 수행하는 분야의 연구는 매우 부족한 실정이다^(6,7). Narendra와 Parthasarathy⁽⁶⁾는 신경회로망을 이용하여 동적 시스템을 식별(identification) 하고 제어하는 여러 방법에 대해 정리하였다. Krishna-Kumar와 Montgomery⁽⁷⁾는 유연한 구조물에 대해 신경망 제어기를 사용하여 적응 제어를 수행하였다. Rao 등⁽⁸⁾은 형상기억합금을 작동기로 사용하는 구조물에 대해 신경망 제어기로 진동 제어를 수행하여 효과적인 제어가 이루어짐을 보였다.

여러 동특성 변화 요인중 본 연구에서는 압전 세라믹 접착층의 층간 분리에 의한 동특성 변화, 특히 작동 능력 변화에 대해 실험적으로 고찰해보기로 한다. Cole 등⁽⁹⁾은 압전재료를 사용하는 경우 모드 변수(modal parameter)를 실험적으로 구하고 이를 해석 결과와 비교하였고, Kim과 Jones⁽¹⁰⁾는 압전 세라믹의 접착층 층간 분리 크기에 따른 고유진동수의 변화를 해석하고 이를 실험 결과와 비교하였다.

본 연구에서는 압전 세라믹 접착층 층간 분리에 따른 동특성 변화를 실험적으로 고찰하였고 이러한 시스템의 동특성의 변화가 생기는 경우와 정상적인 경우에 대해 신경망 제어기를 도입, 모의 적응 진동 제어 실험을 수행하였다. 또한 DSP (digital signal

processor)를 이용하여 신경망 제어를 구현하고, 실시간(real-time) 적응 진동 제어 실험을 수행하여 신경망 제어기의 성능에 대해 연구하였다.

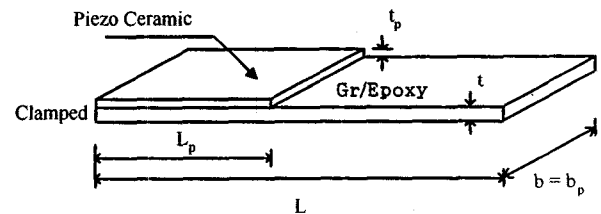
2. 압전 작동기 접착층 층간 분리에 따른 복합재 보의 동적 특성 변화

모드 좌표계에서 압전 작동기가 부착된 구조물의 운동 방정식은 다음과 같다⁽¹¹⁾.

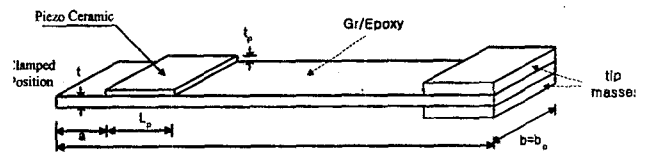
$$\ddot{\eta}_r + 2\zeta_r \omega_{nr} \dot{\eta}_r + \omega_{nr}^2 \eta_r = f_r V \quad (r=1, 2, \dots, \infty) \quad (1)$$

여기서 V 는 압전 작동기에 가해지는 전압, η_r 은 모드 변위(modal displacement), 첨자 r 은 모드를 표시하고, ζ 는 감쇠비(damping ratio), ω_n 은 고유진동수(natural frequency)를 그리고 f_r 은 단위 전압에 대한 r 번째 모드의 모드 제어력을 나타낸다. 특히 압전 작동기 자체는 능동적 요소만이 아니라 수동적인 요소로도 작용하므로 모드 제어력은 작동기의 부착위치, 모드 형상, 접착층 등의 효과가 복잡하게 얽혀 있게 된다.

압전 작동기의 부착면에 층간 분리가 생긴 복합재 시편과 정상적인 시편의 고유진동수와 모드 제어력을 실험적으로 구하여 층간 분리에 따른 시스템의 변화를 살펴 보았다. 압전 세라믹을 부착할 때 층간



(a) Gr/Epoxy $[0_2 / \pm 45_2 / 90_2]$, composite beam with a delaminated piezo ceramic actuator



(b) Gr/Epoxy $[0 / 90]$, composite beam with a delaminated piezo-actuator and tip masses





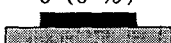
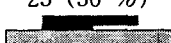
Fig. 1 Geometry of the composite beams with a delaminated piezo ceramic actuator

Table 1 Dimensions and configurations of the composite beams with a delaminated piezo ceramic actuator

Specimen No.	Stacking sequence (Gr/Epoxy)	Dimensions of host structure $L \times b \times t$ (mm ³)	Dimensions of Piezo ceramic $L_p \times b_p \times t_p$ (mm ³)	Delamination size (mm)	Thickness of adhesive (mm)
1	$[0_2 / \pm 45_2 / 90_2]_s$	$2 \times 2 \times 0.835020$	$50 \times 20 \times 0.4$	0	0.04
2	$[0_2 / \pm 45_2 / 90_2]_s$	$2 \times 2 \times 0.835020$	$50 \times 20 \times 0.4$	12.5	0.04
3	$[0_2 / \pm 45_2 / 90_2]_s$	$2 \times 2 \times 0.835020$	$50 \times 20 \times 0.4$	25.0	0.04
4	$[0_2 / \pm 45_2 / 90_2]_s$	$2 \times 2 \times 0.835020$	$50 \times 20 \times 0.4$	37.5	0.04
5*	$[0 / 90]_s$	$3 \times 2 \times 0.425000$	$50 \times 20 \times 0.2$	0	0.04
6*	$[0 / 90]_s$	$3 \times 2 \times 0.425000$	$50 \times 20 \times 0.2$	25	0.04

* Composite beams with a delaminated piezo ceramic actuator and tip masses

Table 2 Frequencies, and modal control forces for Gr/Epoxy $[0_2 / \pm 45_2 / 90_2]_s$ composite beams with a delaminated piezo ceramic actuator

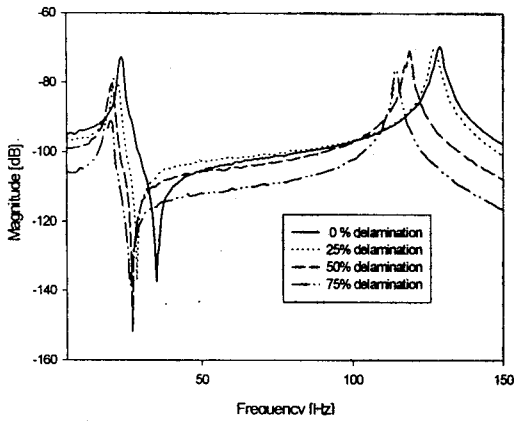
Specimen No.	Delamination Size (mm)	1st frequency (Hz)	1st modal control force (sec ⁻² / V)	2nd frequency (Hz)	2nd modal control force (sec ⁻² / V)
1 (experiment)	0 (0%) 	23.739	0.006977	128.697	0.02957
2 (experiment)	12.5 (25%) 	21.843	0.005287	127.384	0.03113
3 (experiment)	25 (50%) 	20.152	0.002333	118.325	0.01598
4 (experiment)	37.5 (75%) 	19.284	0.001001	114.547	0.007937
5* (experiment)	0 (0%) 	0.859	0.0002670	-	-
6* (experiment)	25 (50%) 	0.625	0.0001384	-	-

* Composite beams with a delaminated piezo ceramic actuator and tip masses

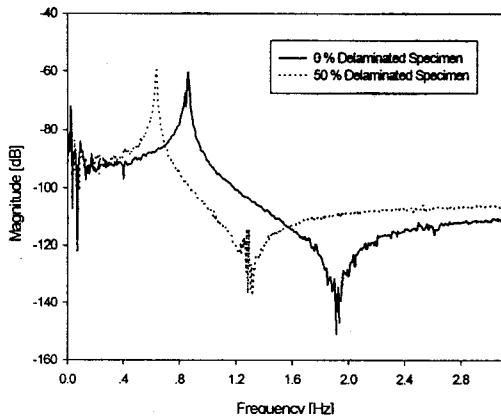
분리를 형성하고자 하는 부분에 두께 0.02 mm의 테프론 필름(teflon film)을 부착하여 인위적으로 층간 분리를 형성하였고 실험에 사용된 시편의 형상과 크기는 Fig. 1과 Table 1에 나타내었다. 시편 1-4의 경우에는 모드 제어력을 구하기 위해 고정부위에서 20 mm 떨어진 위치에서, 시편 5,6의 경우는 고정부위에서 10 mm 떨어진 위치에서 상용 감지기와 충격 망치(impact hammer)를 이용. 감지/가진하여

질량 정규 모드 형상(mass normalized mode shape)을 구했고 다시 압전 세라믹으로 가진하여 모드 제어력을 실험적으로 측정하였다. 자세한 실험 방법은 참고 문헌 (11)에 정리된 바 있다.

실험의 결과로 Fig. 2에는 각 시편의 주파수 응답 함수를 비교하였고, Table 2에서는 층간 분리의 정도에 따른 첫번째, 두번째 고유 진동수와 모드 제어력의 변화를 보였다. 결과를 살펴보면 층간 분리가



(a) Frequency response functions for the Gr/Epoxy $[0_2 / \pm 45_2 / 90_2]_s$ composite specimen with a delaminated piezo ceramic actuator



(b) Frequency response functions for Gr/Epoxy $[0 / 90]_s$ composite beams with a delaminated piezo-actuator and tip masses

Fig. 2 Frequency response functions for the composite specimen with a delaminated piezo-actuator

커질수록 고유 진동수와 모드 제어력이 크게 낮아지는 것을 알 수 있다. 시편 1, 2의 두번째 모드에서 층간 분리가 없는 경우보다 25%의 층간 분리가 있을 때 모드 제어력값이 조금 증가하는 경우도 관찰되는데, 이는 층간 분리가 생기는 부분이 두번째 모드의 모드 형상에서 곡률이 반대로 변하는 부분이라 모드 제어력이 상쇄되기 때문이다.

이와 같이 압전 세라믹 접착층에 층간 분리가 생기는 경우 고유 진동수의 변화와 모드 제어력의 변화가 매우 커서 시스템 특성이 크게 변화하며, 특히 작동기의 작동 능력이 현저히 저하되는 것을 알 수 있다.

3. 신경망 제어를 이용한 적응 진동 제어 모의 실험

신경 회로망은 경험과 학습을 통한 인간의 지식 습득 과정을 모방, 인간의 신경 세포를 하나의 인공 뉴런(artificial neuron)으로 모델링 한 구조이다. 신경 회로망이 원하는 출력값을 갖도록 연결강도 (weight, w), 바이어스(bias, b)와 같은 매개변수를 조정하는 과정을 학습(learning)이라 하고 간단한 신경 회로망의 모습은 Fig. 3에 보였다⁽¹²⁾.

여러가지 학습 알고리즘 중 본 연구에서는 하나의 은닉층(hidden layer)을 사용하고 은닉층의 전달함수를 탄젠트 시그모이드(tangent sigmoid) 함수로, 출력층의 전달함수는 선형 시그모이드 함수를 사용하는 신경 회로망을 오차 역전파 학습방법(error back-propagation learning rule)으로 학습하여 제어를 수행하였다. 오차 역전파 학습방법의 기본적인 배경은 경사 강하 법칙(gradient descent procedure)에 두고 있다⁽¹²⁾. 오차함수 $E(w, b)$ 가 있을 경우 최소의 오차를 갖는 해인 연결강도와 바이어스를 찾기 위해서 임의의 초기값으로부터 시작, 오차 함수의 감소 방향으로 각 뉴런의 연결강도와 바이어스를 반복 보정하여 계산을 수행하게 된다. 오차 함수를 다음과 같이 정의한다.

$$E = \frac{1}{2} \sum_k (d_k - O_k)^2 \quad (2)$$

여기서 d_k 는 교사 학습 시 주어지는 원하는 목표 출력 패턴이며, O_k 는 출력층의 출력값을 말한다. 결과적으로 연결강도 변량은 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\Delta w_{kj} = \eta \delta_k O_j \quad (3)$$

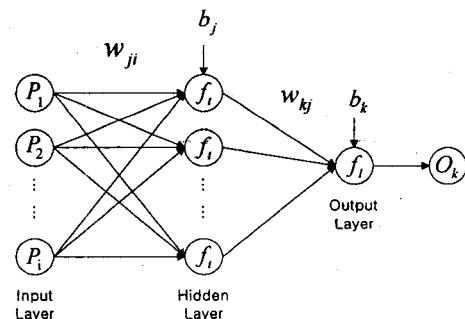


Fig. 3 Layered feedforward neural network

여기서 η 는 진행정도(step size)를 나타내는 학습률(learning rate)을, O_j 는 은닉층의 출력값을 그리고 $\delta_k = (d_k - O_k) f'_i(net_k)$ 는 단위 k 의 오차기울기(error gradient) 또는 델타 함수(delta function)라고도 부른다. 델타 함수에서 f_i 는 출력층의 선형 전달 함수, ()'은 미분 연산을 각각 의미하며, $net_k = \sum_k w_{kj} O_j$ 로 정의한다⁽¹³⁾.

위와 같은 방법으로 k 층의 바이어스의 변량은 아래와 같이 계산된다.

$$\Delta b_k = \eta(d_k - O_k) \tag{4}$$

은닉층인 경우 원하는 은닉층의 출력값 d_j 가 주어지지 않으므로, 출력층의 오차와 연쇄 법칙을 이용하여 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$\Delta w_{ji} = -\eta(\partial E / \partial w_{ji}) = -\eta \sum_k (\partial E / \partial O_k) \times (\partial O_k / \partial O_j) (\partial O_j / \partial w_{ji}) \tag{5}$$

결과적으로 연결강도 변화량은 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\Delta w_{ji} = \eta \delta_j P_i \tag{6}$$

여기서 P_i 는 입력값이고, $\delta_j = (\sum_k \delta_k w_{kj}) f'_i(net_j)$ 는 j 층의 델타 함수, f_i 는 은닉층의 전달 함수 그리고 $net_j = \sum_i w_{ji} P_i$ 이다.

위와 같은 방법으로 은닉층의 바이어스 변화량은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta b_j = \eta \left(\sum_k \delta_k w_{kj} \right) \tag{7}$$

오차 역전과 학습 알고리즘의 수렴성과 수렴 속도를 증가시키기 위해서 적응 학습률(adaptive learning rate)방법과 모멘텀(momentum)을 병행하여 많이 사용하게 된다⁽¹²⁾.

지금부터는 기본적인 신경 회로망을 이용하여 신경망 제어기에 대해서 살펴보기로 한다. 우선 Fig. 4처럼 시스템의 동적 특성을 모델링하기 위해 신경 회로망을 이용하는 포워드 모델링(forward modeling) 방법을 사용하였다. 신경망 모델을 통해 나오는 출력값 y_m 은 아래 식 (8)과 같이 플랜트의 이전 입력 u 와 출력값 y_p 에 의해 결정되어 진다^(13,14).

$$y_m(t+1) = f(y_p(t), \dots, y_p(t-n); u(t), \dots, u(t-m)) \tag{8}$$

엄밀히 말하면 신경망 모델의 역할은 시스템의 식별이라기 보다는 시스템을 복사(copy)의 형식으로 플랜트의 정확한 정보를 구현하여 신경망 제어기가 알맞은 제어력을 계산하도록 하는 것이다. Fig. 5에서 보듯이 포워드 모델링의 방법으로 신경망 모델을 플랜트의 복사 형태로 만든 후 신경망 모델의 출력값과 목표값의 오차를 이용하여 역전파학습 알고리즘으로 제어기의 연결강도와 바이어스를 보정한다. 제어기의 연결강도와 바이어스를 보정할 때에는 신경망 모델의 연결강도와 바이어스는 보정되지 않는다. 식 (9)와 같이 신경망 제어기의 출력값 u_c 는 플랜트의 이전 출력값들(y_p)을 이용하여 계산되고 이렇게 계산된 신경망 제어기의 출력값은 실 플랜트의 제어력으로 들어가게 된다^(13,14).

$$u_c(t) = f(y_p(t-1), y_p(t-2), \dots, y_p(t-n)) \tag{9}$$

Fig. 5의 신경망 제어 방법으로 2절에서 연구한 압전 세라믹 접착층에 단계적으로 층간 분리가 있는 복합재 시편(시편 1~4)에 대해서 모의 적응 제어 실험을 수행하여 보았다. 신경망 제어기의 입력층과 은닉층의 뉴런수는 각각 10개와 20개를, 출력층의

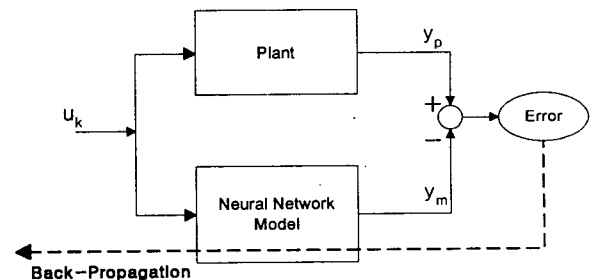


Fig. 4 Forward modeling using neural network model

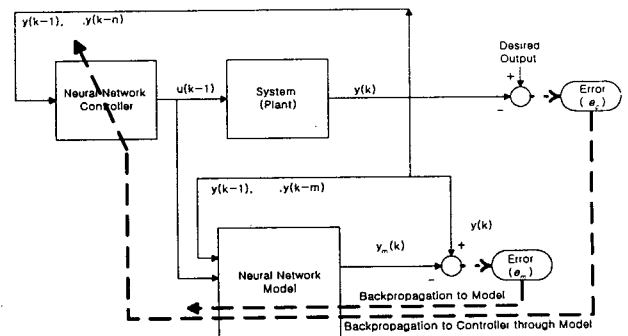


Fig. 5 Supervised neuro-controller with neural network model

뉴런수는 1개를 사용하여 출력값이 신경망 모델의 입력값과 플랜트의 제어력으로 들어가게 하였다. 신경망 제어기의 입력값으로는 플랜트의 이전 출력값 10개를 사용하였다. 신경망 모델은 입력층과 출력층의 뉴런수는 각각 10개씩을, 출력층의 뉴런수는 1개를 사용하였다. 플랜트의 이전 출력값 9개와 함께 신경망 제어기의 출력값을 10번째 입력으로 사용하였다. 모의 실험 수행 시에는 채집 주파수(sampling frequency)를 1 kHz로 하였고 모든 경우에 대해 신경망 제어기와 신경망 모델은 동일한 조건하에서 제어를 수행하였다. 모든 결과 그래프의 진폭은 고정 부위에서 20 mm 떨어진 위치에서 감지한 변위 신호이다. 가진 신호는 아래와 같이 첫번째와 두번째

고유 진동수에 해당하는 주파수를 갖도록 하였다.

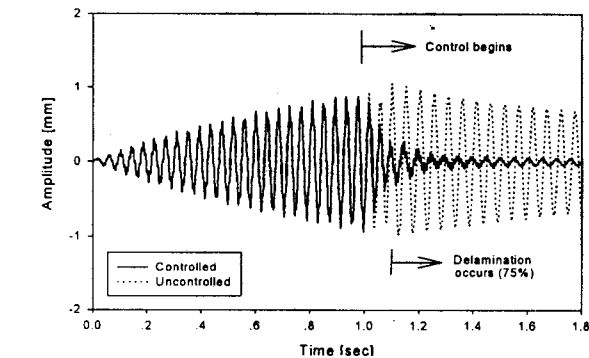
$$u = 40[(\text{square}(\omega_1 t) + \text{square}(\omega_2 t))][\text{volt}] \quad (10)$$

Fig. 6의 경우는 처음 1초 동안 식 (10)과 같이 가진된 후, 1초부터 제어를 수행한 결과이다. Fig. 6(a)은 시스템이 갑자기 변하는 경우, 즉 1.1초에 갑자기 75%의 층간 분리가 생겼다고 가정하고 모의 실험 한 결과이다. Fig. 6(b)는 식 (10)과 같은 외란이 지속적으로 가해질 때 2초부터 제어를 작동시킨 결과이며, 2.1초에 정상이었던 시편이 갑자기 75%의 층간 분리가 생긴다고 가정하였다. 두 경우 모두 시스템이 급격하고 크게 변하여도 좋은 제어 성능을 확인할 수 있다. 특히 외란이 지속적으로 가해지는 경우에도 제어가 효과적으로 수행됨을 알 수 있다.

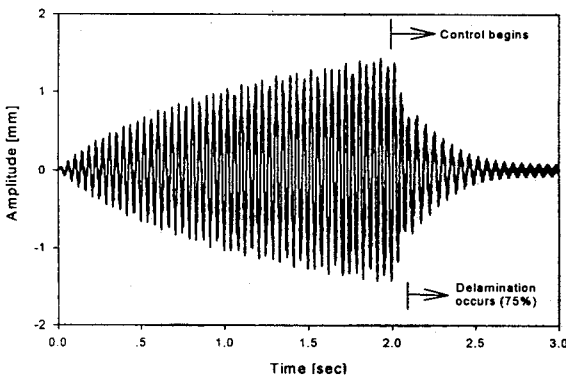
모의 실험을 통해서 신경망 제어기는 급격한 시스템의 변화에 좋은 강건성을 지니고 있음을 확인하였고, 신경망 제어를 이용한 적응 진동 제어의 타당성을 확인하였다.

4. 신경망 제어를 이용한 실시간 적응 진동 제어 실험

4 절에서는 3절에서 소개한 신경망 제어 이론으로 실시간 진동 제어 실험을 수행하였다. 3절의 모의 실험과는 달리 실시간으로 제어를 수행하여야 하기 때문에 신경망 제어기와 모델의 오차 역전파 학습 알고리즘에 의한 계산 시간이 한 채집 시간(sampling time) 안에 이루어 져야 하는 어려움이 있다. 따라



(a) Adaptive vibration control result when 75% delamination occurs at 1.1 sec



(b) Adaptive vibration control result for the Gr/Epoxy [0 / ± 45 / 90]_s composite beam when the 75% delamination occurs at 2.1 sec under persistent disturbance

Fig. 6 Transient and steady state vibration control results for the Gr/Epoxy [0 / ± 45 / 90]_s composite specimen (sensing : 20 mm from clamping position)

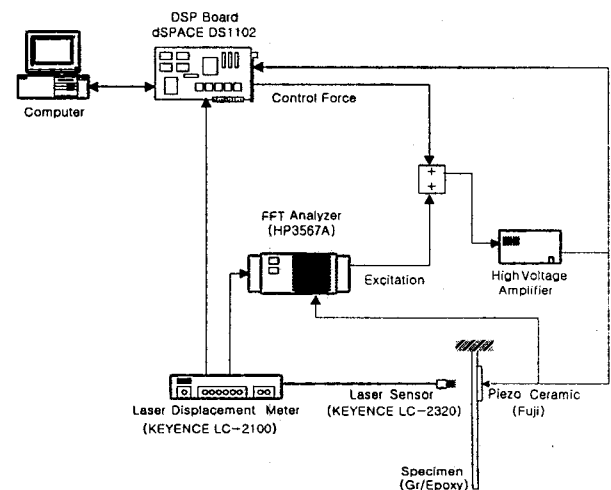


Fig. 7 Experimental setup for the real-time vibration control using neuro-controller

서 실시간 제어에 사용되는 신경망 제어기에는 제어 효율이 약간 감소 하더라도 뉴런수를 적게 조정하고 반복 계산 횟수도 적게 조정하여 한 채집 시간 안에 계산이 수행되도록 하였고 복합재 외팔보 시편의 끝 부분에 15g의 추가 질량 두개를 부착하여, 시편의 고유 진동수를 인위적으로 낮추어 실험을 수행하였다. 사용된 시편의 형상과 크기는 Fig. 1(b)와 Table 1의 시편 5, 6과 같다. 정상적인 시편과 50%의 층간 분리가 있는 두 시편에 대해서 제어 실험을 수행하였다.

각 시편의 첫번째 고유 진동수와 모달 제어력은 Table 2에 보였다. 첫번째 고유 진동수의 변화는 약 30% 정도이고 모달 제어력의 경우는 50% 층간 분리가 있는 시편의 경우 정상적인 시편의 경우에 비

해 절반으로 줄어 드는 것을 알 수 있다. 두 시편의 첫번째 고유 진동수 부근에서의 주파수 응답 함수는 Fig. 2(b)와 같다.

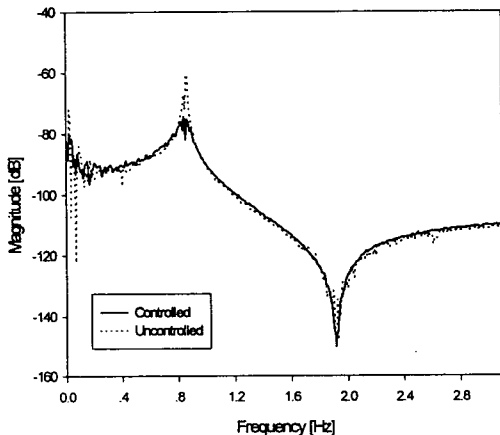
실시간 제어 실험에 사용된 신경망 제어기 입력층의 뉴런수는 10개, 은닉층의 뉴런수는 계산 시간의 단축을 위해서 8개를 사용하였고 출력층의 뉴런수는 1개를 사용하였다. 실험에 사용된 채집 주파수는 100 Hz이며, 이 밖의 사항은 3절의 조건과 동일하다. 신경망 제어기를 이용한 제어 실험 개략도는 Fig. 7과 같다. 신경망 제어기의 구성에는 독일 dSPACE사의 DS1102 DSP 보드를 사용하였다. 실험 방법은 우선 주파수 분석기(FFT analyzer)를 이용하여 시편의 첫번째 고유 진동수로 외부 교란을 생성, 가진하고 이것을 레이저 변위 감지기로 감지한다. 이때 아날로그/디지털 변환기를 통해 들어온 감지기 출력값과 가진 신호를 이용하여 DSP 보드에서 신경망 제어기 알고리즘에 의해 제어력을 계산해 내고 계산된 제어력을 디지털/아날로그 변환기를 통해서 아날로그 신호로 바꾼 후 외부 교란의 가진력과 합하여 압전 작동기로 진동을 제어하게 된다.

Fig. 8에는 각 시편에 대해 비제어 시와 제어 시의 주파수 응답 함수를 보였다. Fig. 8의 (a), (b) 모두 각각의 시편에 대해 8 volt의 크기로 0 Hz에서 3.16 Hz까지 랜덤(random) 가진하고 동일한 신경망 제어기와 모델로 제어를 수행한 결과이다. 제어한 주파수 응답함수를 보면 두 시편의 경우 모두 좋은 제어 성능을 보임을 알 수 있다.

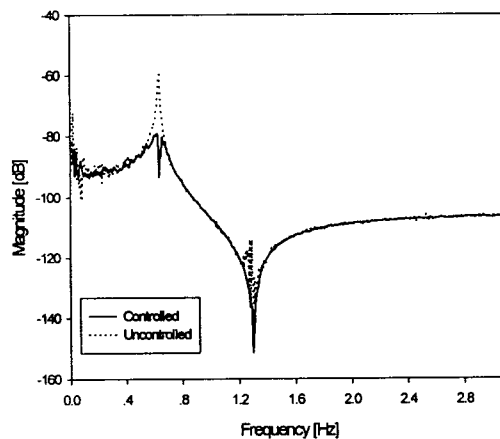
Fig. 9는 진동 제어 도중 시스템이 변화하는 경우이다. 진동 제어 실험 중에 시편에 갑자기 층간 분리를 형성하는 것은 어렵기 때문에 정상적인 시편을 제어하는 도중 신경망 제어기와 모델의 매개변수들을 저장한다. 그리고 정상적인 시편을 50% 층간 분리가 발생된 시편으로 교체한 후 저장된 매개변수들을 초기치로 사용하여 진동 제어를 재개하였다. 외부 교란은 식 (11)과 같이 첫번째 고유 진동수로 지속적으로 가하였다.

$$u = 5 \times \sin(\omega_1 t) [\text{volt}] \quad (11)$$

Fig. 9(a)는 처음에 정상적인 시편에 대해 가진 후 10초부터 제어를 시작한 결과이다. 제어를 시작함과 동시에 신경망 모델과 신경망 제어기를 학습시켰고 정상적인 시편에 대해 35초까지 제어한 후 신경망 모델과 신경망 제어기의 연결강도와 바이어스 등의 매개변수를 저장한다. Fig. 9(b)는 정상적인 시편을 50% 층간 분리가 있는 시편으로 바꾸고 첫

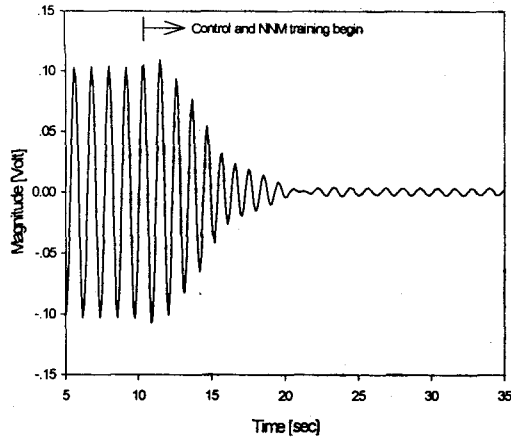


(a) For 0% delaminated piezo-actuator and tip masses

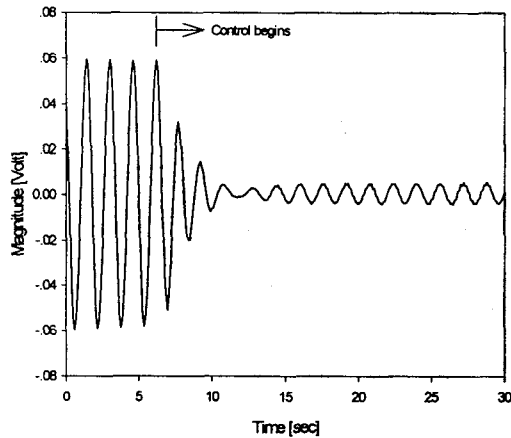


(b) For 50% delaminated piezo-actuator and tip masses

Fig. 8 Vibration control result for the Gr/Epoxy [0/90]_s composite specimen



(a) Adaptive vibration control for the 0% delaminated piezo-actuator



(b) Adaptive vibration control for the 50% delaminated piezo-actuator

Fig. 9 Adaptive vibration control result for the Gr/Epoxy [0/90]_s composite specimen when 50% delamination occurs under persistent disturbance (sensing : 80 mm from clamping position)

번째 고유 진동수로 가진한 후 저장했던 매개변수를 불러들여 6초부터 제어한 결과이다. 수치 모의 실험 뿐만 아니라 실제 진동 제어 실험에서 시스템이 급격히 변화하는 경우에도 신경망 제어가 좋은 제어 성능을 보임을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 시스템이 시간에 따라 변하는 경우에 대해 신경망 제어를 이용하여 모의 적응 진동 제어 실험과 실시간 적응 진동 제어 실험을 수행하

였다. 시간에 따라 변하는 시스템을 구성하기 위해 압전 세라믹 접착층에 층간 분리를 형성하여 고유 진동수와 모드 제어력의 변화를 살펴 보았으며 이러한 변화에 따른 적응 진동 제어 모의 실험과 실시간 적응 진동 제어 실험을 성공적으로 수행하였다. 연구의 결론을 정리하면 다음과 같다.

(1) 압전 작동기의 접착층에 순차적으로 층간 분리를 형성하여 동특성의 변화와 작동 능력의 변화를 살펴 보았다. 층간 분리가 커질수록 고유 진동수가 감소하였고, 특히 작동 능력이 현저히 저하됨을 실험을 통해서 관찰하였다.

(2) 동특성 실험 결과를 바탕으로 신경망 제어를 이용하여 모의 실험을 통해 적응 진동 제어를 수행하였다. 시스템이 급격히 변하는 상황에서도 불안정한 반응 없이 효과적인 제어를 수행하여 신경망 제어기의 타당성을 보였다.

(3) 정상적인 시편에서 50% 층간 분리가 있는 시편으로 시스템이 갑자기 바뀌게 하는 경우에 대해서 DSP 보드를 이용하여 적응 진동 제어 실험을 수행하였다. 시스템의 급격한 변화에도 불구하고 좋은 적응 진동 제어 결과를 확인 하였다.

본 연구에서는 제어기 하드웨어의 한계로 실시간 제어 수행 시 시편의 고유 진동수를 낮추어 시편의 첫번째 고유 진동수만을 제어하게 하였으나 앞으로 신경망 전용 칩의 개발 등 하드웨어의 성능이 향상된다면, 구조물의 고차 진동 모드까지 충분히 제어할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 지원으로 수행된 연구(과제 번호: 96-0200-05-01-3)의 일부이며 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Rogers, C. A., Baker, D. A., and Jaeger, C. A., 1988, Introduction to Smart Materials and Structures, *U.S. ARO Workshop on Smart Materials, Structures, and Mathematical Issues*, VPI & SU, Virginia, Technomic Publishing Co., September.
- (2) Gandhi, M. V. and Thompson, B. S., 1992, *Smart Materials and Structures*, Chapman & Hall, pp. 175-191.

- (3) Han, J.-H., Rew, K.-H., and Lee, I., 1997, An Experimental Study of Active Vibration Control of Composite Structures with a Piezo-Ceramic Actuator and a Piezo-Film Sensor, *Smart Materials and Structures*, Vol. 6, No. 5, pp. 549~558.
- (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) Grady, I. E. and Meyn, E. H., 1989, Vibration Testing of Impact Damaged Composite Laminates, *Proceedings of the AIAA SDM Conference*, Paper No. 89-1411.
- (6) Narendra, K. and Parthasarathy, K., 1990, Identification and Control of Dynamical Systems using Neural Networks, *IEEE Trans. Neural Networks*, Vol. 1, No. 1, pp. 4~27.
- (7) KrishnaKumar, K. and Montgomery, L., 1992, Adaptive Neuro-control for Large Flexible Structures, *Smart Materials and Structures*, Vol. 1, No. 4, pp. 312~323.
- (8) Rao, V., Damle, R., Tebbe, C., and Kern, F., 1994, The Adaptive Control of Smart Structures using Neural Networks, *Smart Materials and Structures*, Vol. 3, No. 3, pp. 354~366.
- (9) Cole, D. G., Saunders, W. R., and Robertshaw, H. H., 1995, Modal Parameter Estimation for Piezostructures, *Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 177, pp. 431~438.
- (10) Kim, S. J. and Jones J. D., 1996, Effects of Piezo-Actuator Delamination on the Performance of Active Noise and Vibration Control Systems, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 7, No. 6, pp. 668~676.
- (11) Han, J.-H., Youn, S.-H., and Lee, I., Nov. 1997, Analytical and Experimental Study of Piezoelectric Actuation for Vibration Control, *Asia-Pacific Vibration Conference 97*, Kyungju, Korea.
- (12) Zurada, J. M., 1992, *Introduction to Artificial Neural Systems*, West Publishing Company.
- (13) Moscinski, J. and Ofonowski, Z., 1995, *Advanced Control with Matlab and Simulink*, Ellis Horwood.
- (14) White, D. A. and Sofga, D. A., 1992, *Handbook of Intelligent Control*, Van Nostrand Reinhold.