

〈논 문〉 SAE NO. 97370043

## 지능제어 기법에 의한 유연 외팔보의 능동 진동제어

### Active Vibration Control of Flexible Cantilever Beam by Intelligent Control Technique

신 준\*, 박 수 홍\*\*, 오 재 응\*\*  
J. Shin, S. H. Park, J. E. Oh

#### ABSTRACT

In this study, active vibration control for a flexible cantilever beam was performed by using the intelligent control technique. The intelligent control method which integrating the back propagation algorithm and the fuzzy inference technique was proposed and its performance was examined. The proposed control algorithm for the flexible cantilever beam was verified via computer simulation of active vibration control. furthermore, the control system and its efficiency were investigated via experiments on active vibration control by the intelligent control technique without a digital signal processing device.

주요기술용어 : Intelligent Control(지능제어), Active Vibration Control(능동 진동제어), Piezo Actuator(피에조 가진기), Flexible Cantilever Beam(유연 외팔보)

#### 1. 서 론

구조물에 대한 저주파 진동은 운송수단, 가전 제품, 군용장비, 항공장비와 같은 많은 종류의 경량 유연 구조물에 있어서 지속적인 문제점으로 부각되고 있다. 특히, 대형의 경량 구조물에서 구조적으로 발생하는 저주파 진동은 경감쇠와 유연성으로 인하여 일단 진동이 시작되면 낮은 고

유 진동수로 장시간 지속되기 때문에 성능과 정숙성에 좋지 않은 영향을 미친다.<sup>1)</sup> 따라서 이러한 저주파 진동을 제어하기 위하여 많은 연구가 수행되고 있는데 구조물에 감쇠를 증가시키거나 질량을 추가시키는 기존의 수동적 방법은 저주파 영역에 대한 제어 효율이나 부피면에서 단점을 갖게 되므로 능동 진동제어 방법이 최근 활발히 연구되고 있다<sup>2),3)</sup>.

한편 능동 진동제어를 효과적으로 수행하기 위해서는 적절한 센서와 가진 시스템이 선정되어야 하는데 기존의 센서/가진 형태는 이산화된 점 가진 형태이므로 이러한 경량의 유연 구조물에

\* 정회원, 국립 원주전문대 자동차과

\*\* 정회원, 한양대학교 정밀기계공학과

\*\*\* 정회원, 한양대학교 자동차공학과

적용하기가 힘들다. 따라서 최근 피에조 세라믹, 피에조 폴리머와 같은 웨이퍼형의 재료들이 더욱 현실적인 가진기로서 연구되고 있는데 이러한 재료들은 분포특성, 가격, 효율, 부피 등의 측면에서 기존의 센서/가진 시스템에 비하여 주요한 장점을 갖고 있다<sup>4),5)</sup>.

그러나 이러한 피에조 재료들은 자체가 본질적으로 비선형성을 내포하고 있으며 유연 구조물이 대형화, 복잡화함에 따라 비선형 특성은 더욱 증가하게 된다. 또한 기존의 적응제어 방식에 있어서 고차의 필터 계수를 갱신하기 위한 전용 신호처리(DSP) 보드가 필요하며<sup>6)</sup> 센서와 가진기 위치의 불일치에 따른 제어 스펙 오우버(spillover) 문제가 야기될 수도 있으므로 이러한 현상들을 효과적으로 극복할 수 있는 새로운 제어 기법이 요구되고 있다<sup>7),8)</sup>.

따라서 본 연구에서는 피에조 세라믹과 지능제어 기법을 활용하여 유연 외팔보에 대한 능동 진동제어 시스템을 구성하고자 한다. 이를 위하여 역전파 알고리즘과 퍼지 추론 방식을 통합한 지능제어 기법을 제안하고 성능을 평가한다. 그리고 피에조 세라믹이 부착된 유연 외팔보의 특성을 개발된 알고리즘을 이용하여 학습하고 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 제어계 및 지능제어기법의 타당성을 검토한다. 또한 진동제어 실험을 통하여 기존의 능동제어 방식에서 예측 필터의 계수를 갱신하기 위하여 필수적으로 사용되었던 전용 신호처리 보드를 이용하지 않는 효과적이고 단순한 실시간 제어계를 구현하며 기존의 직접 속도 제한 제어 결과와 비교함으로써 지능제어 방식에 의한 능동 진동제어 효과를 검증한다.

## 2. 지능제어 기법

### 2.1 자기조정 학습제어 방식

본 연구에서는 외팔보의 능동 진동제어에 역전파 알고리즘<sup>9)</sup>의 적용에 있어 시스템의 변화에 따라 제어기 설계자의 경험과 시행착오를 요구하는 학습계수의 자동 선정을 위해 인간의 경험적 지식을 규칙적으로 표현할 수 있는 퍼지 추론기법<sup>10)</sup>

을 도입하여 자기조정 학습계수 알고리즘을 제안한다.

역전파 알고리즘에서 총 오차함수  $E_p$ 는 (1)식과 같이  $k$ 번째 출력값  $o_k$ 와 여기에 대응하는 원하는 출력값  $d_k$ 와의 차이를 제공하여 출력 노드의 갯수  $l$ 에 대하여 더하는 것으로 정의된다<sup>11)</sup>.

$$E_p = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^l (d_k - o_k)^2 \quad (1)$$

한편 역전파 알고리즘에서 각 층(layer)간의 가중값과 임계값을 갱신하기 위하여 사용되는 학습계수는 가중값의 변화  $\Delta\omega$ 를 결정하기 위한 (2)식에서 요구된다.

$$\Delta\omega = -\eta \frac{\partial E_p}{\partial \omega} \quad (2)$$

여기서 학습계수  $\eta$ 는 물리적으로 기울기 방향으로의 이동에 대한 스텝의 크기를 의미하므로 학습계수가 너무 크게 선정되었을 경우 출력층의 총 오차가 발산할 수 있고, 반면 너무 작게 선정되면 학습 시간이 오래 걸리고 극부적 최소에 빠지기 쉽다. 일반적으로 기존의 방식에서는 학습계수를 작은 값으로 고정하여 역전파 알고리즘에 적용하고 있으나 이 경우 위에서 언급한 학습시간이 길어지고 극부적 최소 문제에 부딪히게 된다. 따라서 본 연구에서는 학습계수의 자동 선정을 위해 퍼지 추론방식을 도입함으로써 학습시간을 단축시키고 수렴성능을 향상시킬 수 있는 자기조정 학습계수 알고리즘을 제안하고 이 기법의 타당성을 비선형 모델에 적용하여 검증하였다.

자기조정 학습계수 알고리즘에서 퍼지 추론을 위해 이용한 입력변수는 (1)식과 같이 계산된 출력층의 총 오차  $E_p$ 와 총 오차의 변화율  $\Delta E_p$ 이며 출력변수는 학습계수의 변화량  $\Delta\eta$ 이다. 자기조정 학습계수 알고리즘을 위한 입력변수  $E_p$ 의 멤버십 함수는 Fig.1과 같이 구성하였다.

그림에서  $x$ 축은 총 오차에 대한 값을 5개의 언어적 변수-AZ(Approximately Zero), VS(Very Small), SM(Small), ME(Medium), BI

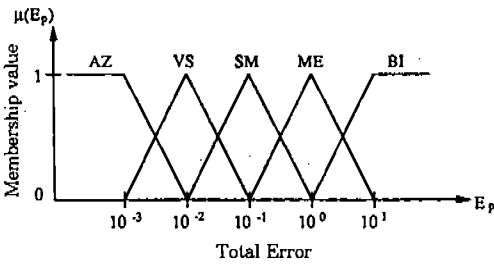


Fig.1 Triangular membership function for total error

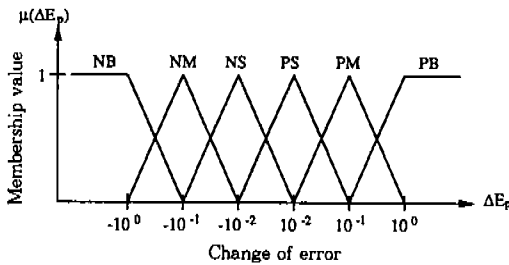


Fig.2 Triangular membership function for the change rate of total error

(Big)-로 구분하여 분할하였으며 지수적 스케일로 표현하였다.  $y$ 축은 0에서 1로 정규화된 멤버쉽 값을 나타내고 있다.

또한 Fig.2는 총 오차의 변화율  $\Delta E_p$ 에 대한 멤버쉽 함수를 나타내고 있는데  $x$ 축은 6개의 언어적 변수-NB(Negative Big), NM(Negative Medium), NS(Negative Small), PS(Positive Small), PM(Positive Medium), PB(Positive Big)-로 구성하였다.

한편 출력  $u$ 에 대한 멤버쉽 함수의 형태와 언어적 변수는 Fig.2와 동일하다. Table 1은 각 규칙의 조합을 나타낸 판단 테이블로서 퍼지추론과 비퍼지화를 거친 출력인 학습계수의 변화량은 앞 단계의 학습계수  $\eta$ 에 가감되어 새로운 학습계수  $\eta'$ 을 (3)식과 같이 계산한다. 새로운 학습계수는 역전과 알고리즘의 매 반복시 계산되어 앞 시스템의 학습계수를 대치하여 학습을 수행하게 된다.

$$\eta' = \eta + \Delta\eta \tag{3}$$

Table 1 Linguistic decision table for each rules

$\Delta E_p \backslash E_p$	AZ	VS	SM	MI	BI
NB	NS	NS	NS	NS	NS
NM	NS	NS	NS	NM	NM
NS	NS	NS	NM	NM	NB
PS	NS	NS	NM	PM	PB
PM	NS	PS	PS	PM	PM
PB	PS	PS	PS	PS	PS

### 2.2 성능 평가

본 연구에서는 자기조정 학습계수를 이용한 지능제어 방식을 비선형 시스템에 적용하여 알고리즘의 타당성 및 효율을 검증하였다. 비선형 시스템으로 채택한 운동 방정식은 헤논 맵(Henon map)<sup>12)</sup>으로서 (4)식과 같이 묘사할 수 있다. 이 방정식은 예측 불가능한 랜덤 특성을 갖고 있으며 외부 힘은 포함되어 있지 않다.

$$x_1(t) = x_2(t-1)$$

$$x_2(t) = 1.4 - x_1^2(t) + 0.3x_1(t-1) \tag{4}$$

본 연구에서는 헤논 맵 문제를 역전과 알고리즘의 학습 성능 평가에 적용하기 위하여 입출력 변수를 (5)식과 같이 3개의 입력과 1개의 출력으로 구성하였다.

$$X = [(x_1(t-1) - x_1(t)), x_1(t), (x_1(t) - x_1(t+1))]^T$$

$$d = x_2(t) \tag{5}$$

한편 인공 신경망 모델은 3개의 입력 노드, 13개의 은닉층 노드, 1개의 출력 노드로 하였으며 학습 결과에 대한 평가는 1000회 반복 후 오차의 수렴 정도와 총 오차가 0.01 이하로 수렴한 반복 횟수에 대하여 표준적인 역전과 알고리즘과

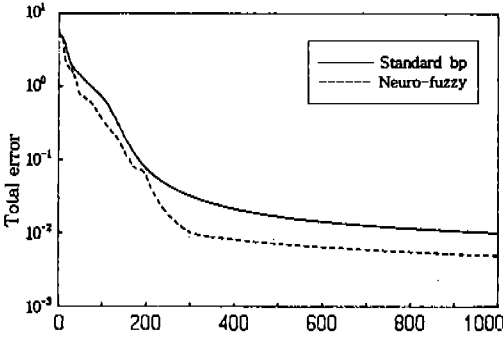


Fig.3 Comparison result of total error by two methods

본 연구에서 제안한 자기조정 학습계수 알고리즘 과를 비교하였다. Fig.3은 총 오차의 추이를 1000회의 반복 동안 측정하여 나타낸 것이다.

최종 오차값은 표준 역전파 알고리즘이  $1.01 \times 10^{-2}$ 이고(학습계수는 0.1로 일정) 자기조정 학습계수 알고리즘이  $0.49 \times 10^{-2}$ 이다. 또한 총 오차가 0.01이하로 수렴되는 반복 횟수는 표준 역전파 알고리즘의 경우가 1045회 이며, 자기조정 학습계수 알고리즘의 경우에는 400회 이다. 결과에서 알 수 있듯이 제안한 알고리즘을 이용하여 외팔보의 진동 특성을 예측할 수 있을 것으로 기대된다.

### 3. 컴퓨터 시뮬레이션

#### 3.1 제어계 추정 성능 평가

본 장에서는 외팔보에 대한 능동 진동제어를 위하여 피에조 세라믹 재료와 외팔보의 모델링을 포함하는 특성을 학습하여 진동제어를 효과적으로 수행할 수 있는 단순한 제어계를 설계하였다. 컴퓨터 시뮬레이션을 위한 외팔보의 고유함수는 오일러(Euler) 이론에 의하여 고정-자유(fix-free) 조건하에서 계산하였다<sup>13)</sup>. Fig.4는 본 연구에서 적용한 역전파 모델을 나타내고 있는데 입력층, 은닉층, 출력층의 3층으로 구성되어 있으며 각 층의 노드수는 각각 1, 13, 1개이다.

역전파 알고리즘의 학습시 필요한 입력력 쌍을 구성하기 위하여 가진기에 랜덤한 입력원을 가하

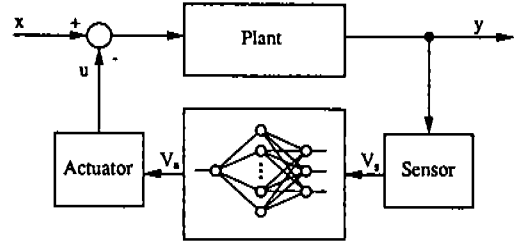


Fig.4 Block diagram of the control model for active vibration control

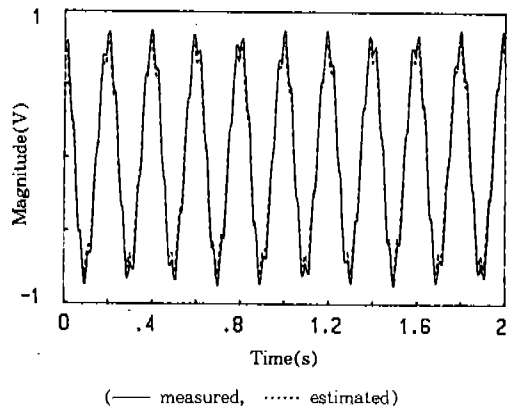


Fig.5 Comparison of the estimated and measured signal for system identification

여 센서에서의 출력값을 측정하였다. 한편 제어 시에는 센서로 부터 측정된 신호를 분석하여 가진기에 제어 신호를 공급하기 때문에 이 모델에 대한 학습시에는 입력층에 공급되는 데이터를 센서에서의 출력신호  $V_s(t)$ 와 출력신호의 변화량  $V_s(t-1) - V_s(t)$  그리고 가진기로의 입력 신호  $V_a(t)$ 로 하였으며 출력층의 데이터는 가진기로의 한 스텝 앞선 입력신호  $V_a(t+1)$ 로 하였다. 학습을 위한 입력력 쌍은 100개로 하였으며 제안한 자기조정 학습계수 알고리즘을 이용하여 학습을 수행하였다.

Fig.5에는 센서에서의 출력 신호와 역전파 알고리즘을 이용하여 추정한 예측신호를 비교하였다.

그림에서 알 수 있듯이 두 결과가 거의 일치하고 있으며 따라서 본 알고리즘을 이용하여 진동 제어 모델을 효과적으로 해석할 수 있다는 것을 알 수 있다.

### 3.2 외팔보의 능동 진동제어

능동 진동제어를 위한 시뮬레이션에서는 오일러(Euler) 빔 이론에 의하여 계산된 시스템의 진동 특성을 학습하여 임펄스 가진에 대한 진동 제어 효과를 고찰하였다. Table 2는 시뮬레이션에 이용된 외팔보의 물성치를 나타내고 있다.

한편 Fig.6은 자유단 위치에서 외팔보의 제어 전과 제어 후에 대한 시간영역 데이터를 나타내고 있다.

그림에서 알 수 있듯이 많은 양의 저감 효과를 보이고 있으나 피크 부근에서 잔류 진동이 남아 있는 것을 확인할 수 있다. 또한 Fig.7은 외팔보에 대한 제어 결과를 주파수 영역에서 나타낸 것으로 3개의 모드가 존재함을 알 수 있다.

그림에서 각 모드에 대하여 약 20dB 정도의

진동 저감이 이루어지고 있는 것을 알 수 있으며 스피클 오우버 문제는 크게 나타나고 있지 않다. 한편 시간영역 데이터에서의 잔류 진동이 주요 모드 이외의 영역에서 영향을 미치고 있는 것으로 판단되며 이러한 형상은 D/A 변환시 재생필터(reconstruction filter)등을 사용함으로써 제거할 수 있을 것으로 생각된다. 또한 3차 모드에 대한 제어 효과가 떨어진 이유는 샘플링 시간을 길게 잡았기 때문인 것으로 생각되나 제어 알고리즘의 실행 시간에 대한 한계 때문에 향상된 결과를 얻기는 힘들 것으로 생각된다. 그러나 일반적인 진동제어 문제에서 제어하고자 범위는 주로 1차 또는 2차 모드에 집중되고 있으므로 제안한 알고리즘을 이용하여 효과적인 진동저감 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

Table 2 Properties of the cantilever beam for active vibration control

Properties	Value
Length(m)	0.34
Width(m)	0.016
Thickness(m)	0.006
Mass(kg)	0.01
Mass density(kg/m)	0.029
Young's modulus(N/m <sup>2</sup> )	7.1e+10
Moment of inertia(m <sup>4</sup> )	2.88e-13

### 4. 실험

#### 4.1 실험 장치 및 방법

Fig.8은 유연 외팔보의 능동 진동제어를 위한 제어계의 구성을 나타내고 있다.

실험에서 제어력의 생성을 위한 피에조 세라믹은 도전성 에폭시를 사용하여 외팔보의 고정단에 부착 하였다. 또한 출력 신호는 자유단에서 레이저 변위계로 측정하였으며 계측된 신호는 곧바로 A/D 변환기로 입력되고 별도의 신호처리 프로

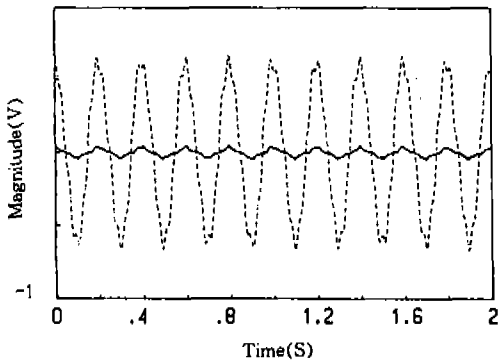


Fig.6 Control result of the cantilever beam at the time range

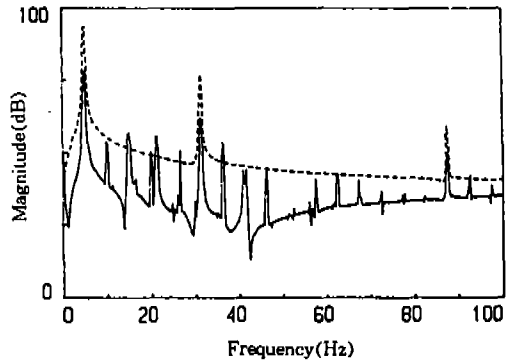


Fig.7 Control result of the cantilever beam at the frequency range

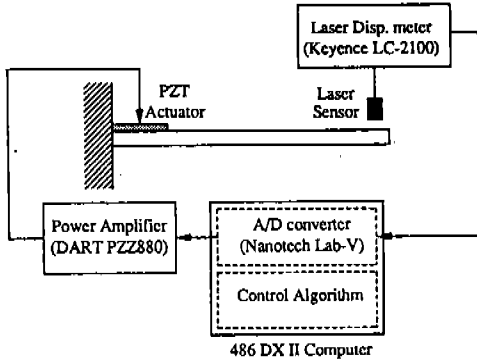


Fig.8 Block diagram of active vibration control for the cantilever beam

Table 3 Dimensions and properties of the cantilever beam

Properties	Value
Length(m)	0.37
Width(m)	0.02
Thickness(m)	0.007
Mass(kg)	0.01
Mass density(kg/m)	0.027
Young's modulus(N/m <sup>2</sup> )	7.1e+10

세서를 부착하지 않은 컴퓨터 내부의 계산 과정을 거쳐 D/A 변환기로 출력된다. 제어 알고리즘은 3.1절의 컴퓨터 시뮬레이션과 동일한 지능 제어 모델을 사용하였으며 출력 신호는 증폭기에서 피에조 세라믹을 가진 시키기 위한 충분한 전압으로 증폭시킨 후 제어를 수행하였다.

한편 Table 3은 실험에서 제어 대상으로 사용된 알루미늄 외팔보의 재원 및 물성치를 나타내고 있으며 Table 4는 미국 PKI사의 PZT-5 피에조 세라믹 재료의 물성치를 나타내고 있다.

4.2 실험 결과 및 고찰

Fig.9는 외팔보의 자유단에 임펄스 입력을 가했을 경우 제어 전, 후의 시간 응답을 나타내고 있다.

그림에서 직접 속도제한 제어시 양호한 제어

Table 4 Dimensions and properties of the PZT-5 for active vibration control

Properties	Value
Length(m)	0.038
Width(m)	0.02
Thickness(m)	0.005
Mass(kg)	0.0036
Young's modulus(N/m <sup>2</sup> )	6.1e+10
Coupling coeff. $k_{31}$	-0.34

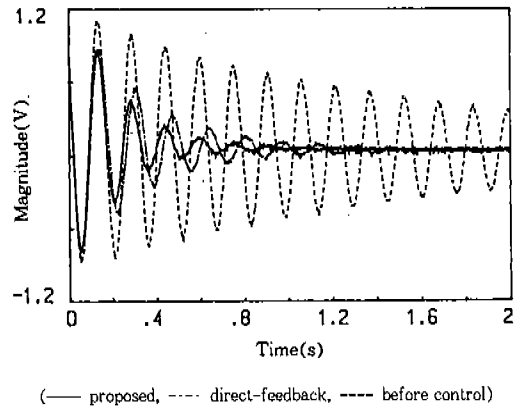


Fig.9 Experimental result of vibration control at the time range

효과를 얻을 수 있으나 센서/가진기의 불일치에 따라 제어된 신호의 피크치가 이동됨을 알 수 있다. 또한 실선으로 나타낸 지능제어 기법에 의한 제어 결과에서 피크치의 이동 없이 우수한 제어 효과를 나타내고 있음을 알 수 있다. 한편 피에조 액츄에이터를 외팔보의 양면에 부착하거나 증폭기의 성능을 증가시킴으로써 정착 시간(settling time)을 더욱 더 효과적으로 줄일 수 있을 것으로 생각된다. 그리고 제어 후 신호에 떨림 현상이 나타나고 있는데 이 효과는 주요 모드(mode) 주위의 성분에 대한 증가 요인으로 작용할 것으로 생각되지만 필터나 가변 게인 등의 활용으로 제거할 수 있을 것으로 판단된다.

Fig.10은 제어 결과를 주파수 영역에서 고찰한 그림이다.

(a) 그림에서 직접 속도제한 제어의 경우 1차

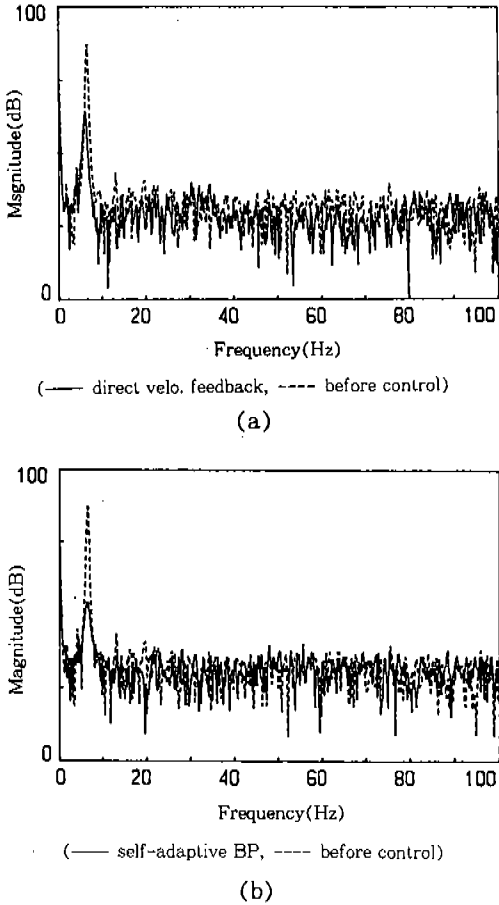


Fig.10 Experimental result of vibration control at the frequency range

모드에서 약 20dB 정도의 진동 저감 효과를 얻을 수 있었지만 1차 고유 주파수가 6.7Hz에서 6.1Hz로 이동되었음을 알 수 있으며 이로 인하여 1차 모드 주위에서 약간의 스플 오우버가 발생되고 있다. 한편 (b) 그림에는 지능제어 기법에 의한 제어 결과를 나타내었는데 제어 후 피크치의 이동 없이 1차 모드에서 약 30dB의 진동 저감 효과를 얻을 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 자기조정 학습계수 알고리즘에 의한 지능제어 기법과 피에조 세라믹 가진기를

이용하여 별도의 신호처리 장비 없이 유연 외팔보의 능동 진동제어를 수행하였다. 제어계와 제안한 알고리즘의 타당성을 검증하기 위한 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 역전과 알고리즘의 학습계수를 퍼지추론 방식을 이용하여 시스템의 특성에 따라 자동으로 적용시킬 수 있는 자기조정 학습계수 알고리즘을 제안하고 성능을 평가하였다.
- 2) 지능제어 기법과 피에조 세라믹 가진기를 이용하고 기존의 능동제어 방식에서 필수적으로 사용되었던 신호처리 전용 보드를 이용하지 않는 효과적이고 단순한 실시간 능동 진동 제어계를 설계하였다.
- 3) 유연 외팔보에 대한 능동 진동 제어 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 통하여 고유 주파수의 이동 없이 1차 모드에서 20dB 이상의 진동제어 효과를 얻었다.

참 고 문 헌

1. S. Y. Hong, *Active Vibration Control of Adaptive Flexible Structures Using Piezoelectric Smart Sensors and Actuators*, Ph. D. Thesis of the Pennsylvania State Univ., USA, 1993
2. G. P. Gibbs and C. R. Fuller, "Experiments on active control of vibrational power flow using piezoceramics actuators and sensors", AIAA, Paper 90-1132, 1990
3. S. J. Kim, *A Study of Piezoelectric Actuators for Active Noise and Vibration Control*, Ph. D., Thesis of Purdue Univ., USA, 1993
4. Warren p. Mason, "Piezoelectricity, its history and application", JASA, 70(6), DEC., 1981
5. A. Baz, S. Pho, "Performance of an Active Control system with Piezoelectric Actuators", J of Sound and Vibration,

- Vol. 126, No. 2, pp. 327~343, 1988
6. P. A. Nelson, S. J. Elliot, *Active Control of Sound*, Academic Press, London, 1989
  7. 신준, 김홍섭, 오재웅, “역전파 알고리즘에 의한 덕트내 소음의 능동제어”, 대한기계학회논문집, 제18권, 제9호, pp. 2265~2271, 1994
  8. F. Rhee, H. R. Lenke, J. G. Dijkman, “Knowledge Based Fuzzy Control of System”, IEEE Trans. on Automatic Control, Vol.35, No.2, pp. 148~155, 1990
  9. J. A. Freeman, D. M. Skapura, *Neural Networks: Algorithms, Applications and Programming Technique*, Addison-Wesley Pub. Company, Reading, 1991
  10. A. Kandel, *Fuzzy Mathematical Techniques with Applications*, Addison-Wesley Pub. Company, Reading, 1986
  11. Y. H. Pao, *Adaptive Pattern Recognition and Neural Network*, Addison-Wesley Pub. Company, Reading, 1989
  12. W. s. Chung, *Identification, Stabilization, control of Nonlinear Systems Using Neural Networks-Based parametric Nonlinear Modelling*, Ph. D. Thesis, Univ. of Southampton, UK, 1993.
  13. F. S. Tse, I. E. Morse, R. T. hinkle, *Mechanical Vibration: Theory and Applications*, Allyn and Bacon, Inc., Boston, 1978