

# 지능제어 방식에 의한 밀폐계 평판의 능동진동제어

신 준\*, 이태연<sup>+</sup>

(논문접수일 2005. 2. 15, 심사완료일 2005. 6. 7)

## Active Vibration Control of the Enclosed Plate by Intelligent Control Method

Joon Shin\*, Tae-Yeon Lee<sup>+</sup>

### Abstract

In this study, vibration control of the enclosed plate which is typical two dimensional structure are performed by using intelligent control method and piezo ceramic as an actuator attached at the plate. The characteristics of the plate with piezo ceramic are examined to identify the natural frequencies. Then, the plate is controlled under the sinusoidal excitation by acoustic source and the reduction level of vibration is examined via frequency response and time sequence. The control result shows the effect of the intelligent control method as a control scheme compared with that of the previous filtered-X LMS algorithm.

**Key Words** : Intelligent Control Method(지능제어), Vibration Control(진동제어), Enclosed Plate(밀폐계 평판)

## 1. 서 론

구조물에 대한 저주파의 진동은 운송수단, 정밀공작기계, 가전제품, 항공장비와 같은 많은 종류의 경량 유연 구조물에 있어서 지속적인 문제점으로 부각되어 왔다. 특히, 자동차 실내와 같이 밀폐된 공간에서 발생하는 탄성 구조물의 진동이나 방사소음은 효율증가 및 에너지 절약을 위한 가벼운 차체의 사용과 맞물려 더욱 심각한 문제로 대두되고 있다.

이러한 소음과 진동을 제어하기 위하여 많은 연구가 진행되고 있는데 구조물에 감쇠를 증가 시키고 질량이나 강성을 부가시키는 기존의 수동적 방법은 500Hz 이하의 저주파에

대한 제어 효율이나 흡음재, 차음재의 사용에 따른 가격과 공간 활용 면에서 단점을 갖게 되므로 이에 대한 대안으로 능동적인 제어방법이 활발히 연구되고 있다<sup>(1)</sup>. 또한 능동제어를 효과적으로 수행하기 위해서는 적절한 가진 시스템이 선정되어야 하는데 기존의 점 가진 시스템 형태는 높은 감쇠율을 가지고 있으나 지지부에 반작용력을 일으키는 결점을 갖고 있다. 이러한 이유로 피에조 세라믹, 피에조 폴리머와 같은 압전 재료들이 분포특성, 가격, 효율, 부피 등의 측면에서 기존의 가진 시스템에 비하여 중요한 장점을 가지고 있어 더욱 현실적인 가진기로서 연구되고 있다<sup>(2)</sup>. 또한 구조물에 부착되어 압전 재료의 수축, 팽창 운동에 의해 발생된 에너

\* 원주대학 자동차 · 기계과 (jshin@wonju.ac.kr)

주소: 220-711 강원도 원주시 남원로 901

+ 원주대학 자동차 · 기계과

지를 제어력으로 사용하여 진동 또는 자세 제어에 활용하고 있다<sup>(5)</sup>. 한편, 최근에는 능동 제어로서 구조물의 비선형성과 제어 스펙오버 문제의 극복을 위한 뉴럴이나 퍼지 등의 알고리즘을 이용한 지능형 제어방식도 연구되고 있다<sup>(4-7)</sup>.

본 연구에서는 피에조 세라믹과 지능제어 기법을 활용하여 밀폐계 평판에 대한 능동 진동제어를 수행하였다. 이를 위하여 역전파 알고리즘과 퍼지추론 방식을 통합한 지능제어 방식을 이용하여 밀폐계 평판의 특성을 학습한 후 평판의 주요 주파수에 대한 진동제어 실험을 수행하였다. 제어 실험에서는 밀폐계의 한쪽 면에 스피커를 설치해 음향 가진하고 반대면에 설치된 유연한 알루미늄 평판에 PZT 가진기를 설치하였다. PZT 가진기와 고정단 사이에는 진동 측정점을 설정하고 여기에 가속도계를 오차센서로 설치한 후 이 위치에서의 진동을 저감시키는 것을 목적으로 하였다. 스피커로 밀폐계 평판을 순음으로 가진한 후 진동 측정점에서 진동을 측정하고 Filtered-x LMS 알고리즘과 지능제어 방식에 의해 진동변위 측정점에서의 진동을 감소시키는 실험을 수행하여 결과를 비교하였다<sup>(8)</sup>.

## 2. 지능제어기법

### 2.1 지능제어 알고리즘

본 연구에서는 밀폐계 평판의 능동 진동제어를 위해 역전파 알고리즘의 학습계수를 퍼지추론 방식으로 자동 선정하는 제어 기법을 이용하였다<sup>(9)</sup>.

입력층, 은닉층, 출력층으로 구성된 역전파 네트워크 구조에서 총 오차함수  $E_p$ 는 식 (1)과 같이  $k$ 번째에 위치한 출력층의 출력값  $o_k$ 와 여기에 대응하는 원하는 출력값  $d_k$ 와의 차를 제곱하여 출력 노드의 개수  $l$ 에 대하여 더하는 것으로 정의된다<sup>(9)</sup>.

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

한편, 역전파 알고리즘에서 각 층간의 가중값  $\omega$ 와 임계값을 갱신하기 위하여 사용되는 학습계수  $\eta$ 는 가중값의 변화  $\Delta\omega$ 를 결정하기 위한 식 (2)에서 요구된다.

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

여기서 학습계수는 적절한 값으로 선정되어야 하며 그렇지 못할 경우 총 오차가 발산하거나 국부적 최소에 빠질 수

있다. 따라서 본 연구에서는 적절한 학습계수의 선정을 위하여 퍼지 추론방식을 통하여 학습계수를 적응적으로 조정하는 기법을 제안하였다.

이 기법에서 퍼지 추론을 위해 이용한 입력변수는 식 (1)과 같이 계산된 출력층의 총 오차  $E_p$ 와 총 오차의 변화율  $\Delta E_p$ 이며, 출력변수는 학습계수의 변화량  $\Delta\eta$ 이다. 입력변수에 대한 멤버십 함수는 삼각형 형태로 구성하였으며 총오차는 5개 언어적 변수 - AZ(Approximately Zero), VS(Very Small), SM(Small), ME(Medium), BI(Big) - 로 구분하여 Fig. 1과 같이 분할하였다. 그림에서 x축의 값은 지수적 스케일로 표현하였으며 y축은 0에서 1로 정규화된 멤버십 값을 나타내고 있다.

또한, 총 오차의 변화율과 출력에 대한 멤버십 함수도 Fig. 2와 같이 삼각형형태로 구성하였으며 x축은 6개의 언어적 변수 - NB(Negative Big), NM(Negative Medium), NS(Negative Small), PS(Positive Small), PM(Positive Medium), PB(Positive Big) - 로 구분하였다.

한편, Table 1은 각 룰의 조합을 나타낸 판단 테이블로서 퍼지추론과 무게중심법을 이용한 비퍼지화를 거친 출력인 학습계수의 변화량은 바로 전 단계의 학습계수  $\eta$ 에 가감되어 식 (3)과 같은 새로운 학습계수  $\eta'$ 가 계산된다. 새로운

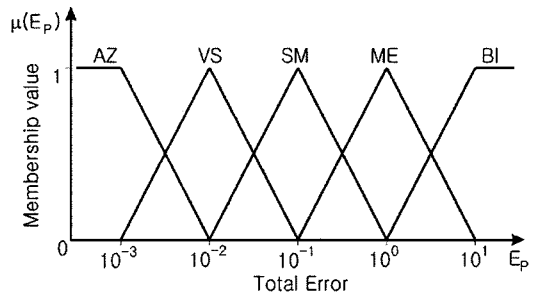


Fig. 1 Membership function for total error

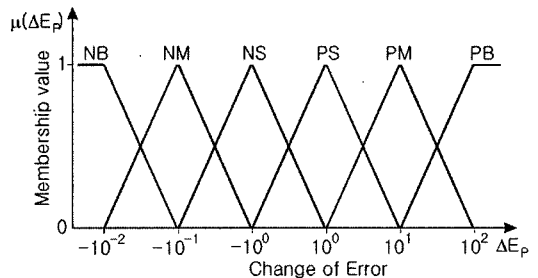


Fig. 2 Membership function for change rate of total error

Table 1 Decision Table for each rules

$\Delta E_p$ \ $E_p$	AZ	VS	SM	ME	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

학습계수는 역전파 알고리즘의 매 반복 시 계산되어 앞 스텝의 학습계수를 대치하여 학습을 수행하게 된다.

$$\eta' = \eta + \Delta\eta \quad (3)$$

### 2.2 알고리즘의 성능평가

본 연구에서 제안한 지능제어 방식을 검증하기 위하여 비선형 운동방정식인 헨맵(Henon map)을 이용하였다<sup>(10)</sup>. 이 방정식은 식 (4)에 나타난 바와 같이 예측 불가능한 랜덤 특성을 갖고 있으며 외부 힘은 포함되어 있지 않다.

$$\begin{aligned} x_1(t) &= x_2(t-1) \\ x_2(t) &= 1.4 - x_1^2(t) + 0.3x_1(t-1) \end{aligned} \quad (4)$$

본 연구에서는 3개의 입력노드와 13개의 은닉층 노드 그리고 과 1개의 출력노드로 구성된 역전파 모델을 이용하여 제안한 학습계수 자동 조정 방식의 성능을 평가하였다. 학습을 위한 입출력 쌍은 3개의 입력  $x_1(t-1)$ - $x_1(t)$ ,  $x_1(t)$ ,  $x_1(t) - x_1(t+1)$ 와 1개의 출력  $x_2(t)$ 로 구성하였다.

Fig. 3은 원하는 출력신호와 제안한 기법에 의한 예측된 신호를 나타내고 있다.

그림에서 점선으로 표시된 부분이 제안한 기법에 의한 예측신호이며 결과에서 알 수 있듯이 두 신호가 거의 일치하고 있다. 따라서 본 연구에서 제안한 기법을 이용하여 헨맵에 의하여 발생된 랜덤한 신호를 적절히 모델링 할 수 있다는 것을 알 수 있다.

## 3. 제어실험 및 결과고찰

### 3.1 실험장치 및 방법

본 연구의 실험장치 구성도는 Fig. 4와 같다. 실험에 사용

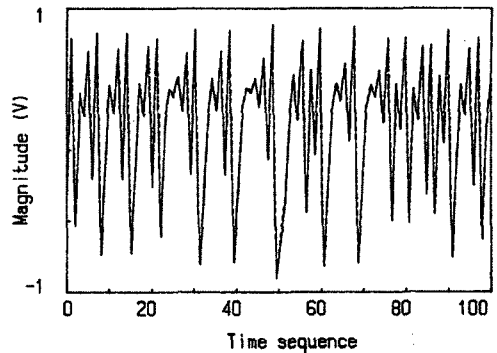


Fig. 3 Prediction of the Henon mapping problem ( — measured, ..... estimated)

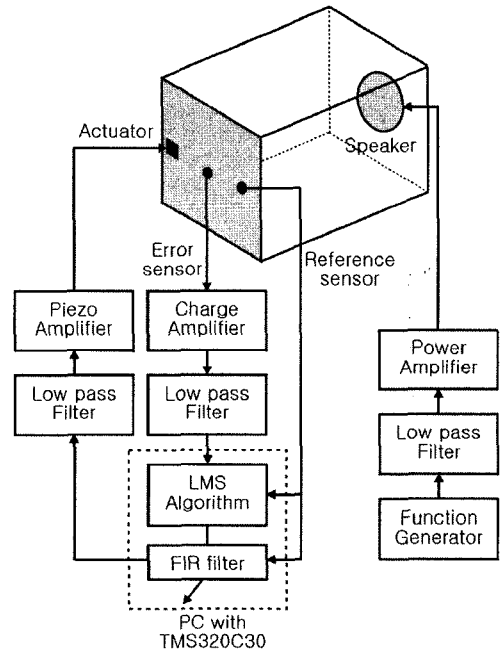


Fig. 4 Experimental set-up for active vibration control of the enclosed plate

된 밀폐계는 590mm×390mm×960mm 크기의 아크릴 상자이며 전면부에는 두께가 0.4mm이고 크기가 590mm×390mm인 알루미늄 판이 설치되어 있다.

알루미늄 평판은 밀폐계의 반대편에 설치된 스피커에 의해 함수 발생기(B&K type 1054)와 증폭기(B&K type 2706)를 이용하여 음향 가진된다. 또한 평판에는 진동 제어력을 발생시키기 위해 크기가 38.1mm×12.7mm인 피에조 세라믹 가진기가 부착되어 있으며, 오차신호는 평판위의 가속

도계 (B&K type 4374)를 이용하여 검출된다. 또한 가속도계 참조센서를 평판 측면에 설치하여 오차센서 이외의 영역에 대한 진동제어 효과를 평가하게 된다.

본 연구에서는 지능제어기법에 의한 진동제어 효과를 다른 제어기법에 의한 결과와 비교하여 검증하기 위해 적응제어 방식에서 가장 널리 사용되는 Filtered-X LMS 알고리즘<sup>(11)</sup>을 이용하였다.

먼저, Filtered-X LMS 기법에서 제어 신호는 FIR filter를 거쳐 피에조 가진기로 입력된다. 제어는 TMS320c30 DSP 보드가 장착된 PC를 이용하였으며 Filtered-X LMS 알고리즘에서 밀폐계 평판의 모델링에 사용된 FIR 계수는 150차이다.

지능제어 기법에서는 학습에 이용된 역전파 모델을 입력층, 은닉층, 출력층의 3층으로 구성하였으며 각 층의 노드수는 각각 3, 19, 1개이다. 학습에 필요한 입력층의 데이터는 가진기로의 입력신호와 오차센서에서의 출력신호 그리고 오차센서에서의 출력신호 변화량으로 구성하였으며 출력층의 데이터는 가진기로의 한 스텝 앞선 입력신호를 이용하였다.

한편, 제어 대상 주파수는 평판을 스피커로 랜덤 가진시 오차센서 위치에서 평판의 주파수 특성을 분석하여 가장 기여가 큰 1차모드인 80Hz와 3차모드인 135Hz를 대상으로 선정하였다. 제어 실험은 80Hz와 135Hz의 정현파로 스피커에 의해 평판을 가진한 후 Filtered-X LMS 알고리즘과 지능제어 방식을 각각 이용하여 수행하였다.

### 3.2 실험결과 및 고찰

#### 3.2.1 80Hz 가진시 제어 결과

Fig. 5는 평판을 80Hz 정현파로 음향가진시켰을 때 오차

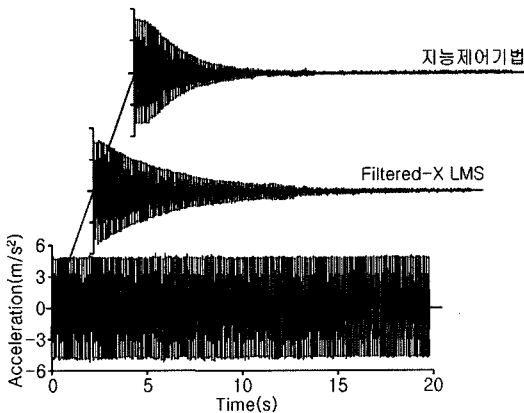


Fig. 5 Time trace of error sensor when excited by 80Hz sinusoidal input

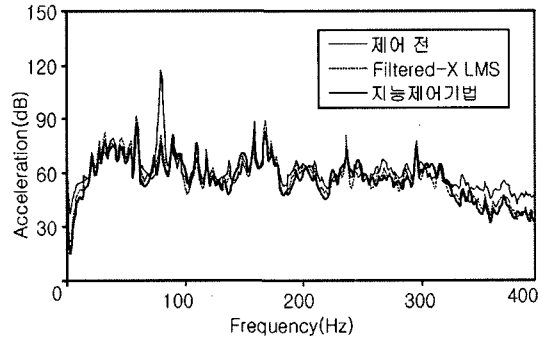
센서에서의 진동을 시간영역에서 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 Filtered-X LMS 알고리즘을 이용한 제어방식이나 지능제어기법에 의한 제어방식 모두 효과적으로 평판의 진동을 제어하여 정상상태에 도달함을 알 수 있다.

그러나 정착시간(settling time)을 비교하여 보면 Filtered-X LMS가 14.2초, 지능제어 기법이 6.8초로 본 연구에서 제시한 지능제어 방식이 2배 이상 우수함을 알 수 있다.

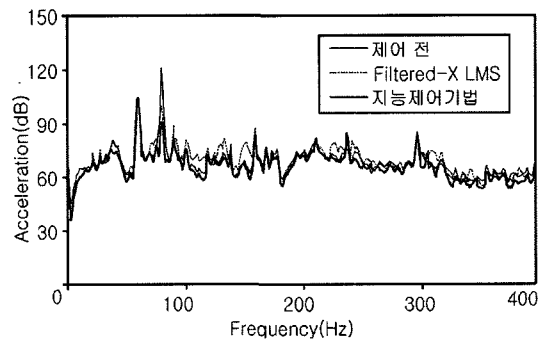
Fig. 6(a), (b)는 80Hz 정현파 음향가진시 오차센서와 참고 센서에서의 신호를 주파수 분석한 결과를 각각 나타내고 있다 주파수 응답의 가속도 값은 ISO 1683에 의거하여 기준 값을  $10^{-6}m/s^2$ 로 하였다.

Fig. 6(a)에서 가진 주파수인 80Hz에 대해 오차센서 위치에서 두 제어방식 모두 약 40dB이 넘는 진동제어 성능을 나타내고 있음을 알 수 있다. 평판의 1차 모드의 경우 오차센서 위치의 변위가 가장 클 것으로 예상되며 이에 따라 두 제어방식 모두 양호한 제어 결과를 얻을 수 있었다.

한편 Fig. 6(b)는 참고센서 위치에서의 제어 결과를 나타



(a) error sensor position



(b) reference sensor position

Fig. 6 Frequency response of sensors when excited by 80Hz sinusoidal input

내고 있는데 Filtered-X LMS 기법의 경우 약 20dB의 진동 저감 효과를 얻을 수 있었고 지능제어 기법의 경우 약 30 dB의 진동저감 효과가 나타났다.

### 3.2.2 135Hz 가진시 제어 결과

Fig. 7은 135Hz의 정현파로 평판을 가진시 오차센서의 신호를 시간영역에서 나타낸 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 기존의 Filtered-X LMS 기법에 의한 제어 방식의 경우 시간이 경과함에 따라 진동이 지속적으로 감소되지만 저감량이나 정착 시간 등에 있어서 큰 효과를 나타내지 못하고 있다. 한편 지능제어 기법에 의한 경우에는 비교적 효과적으로 진동이 제어됨을 알 수 있으나 정착시간의 경우 정상상태의 10% 범위로 확장하여 계산하면 약 11.2초가 소요된다. 이것은 평판의 특정 모드에서는 오차센서 위치에서 진동 변위의 측정이 쉽지 않기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 8(a), (b)는 135Hz 정현파 음향가진시 오차센서와 참고센서의 신호를 주파수 분석한 결과이다. Fig. 8(a)에서 알 수 있듯이 오차센서 위치에서 Filtered-X LMS 기법의 경우 약 10dB 정도의 진동이 저감되지만 지능제어 기법의 경우에는 약 25dB로 훨씬 더 우수한 진동저감 효과를 나타내고 있다. 더욱이 Fig. 8(b)에서 나타난 바와 같이 참고센서 위치에서는 Filtered-X LMS 기법의 경우 진동저감 효과를 얻을 수 없었지만 지능제어 기법의 경우에는 약 20dB의 진동저감 효과를 얻을 수 있었다. 그러나 80Hz 1차 모드의 제어 결과에 비해 135Hz의 경우에는 두 제어기법 모두 진동저감 효과가 다소 작게 나타나며 이것은 고정된 오차센서의 위치 및 단일 가진기 사용에 따른 한계로 해석된다.

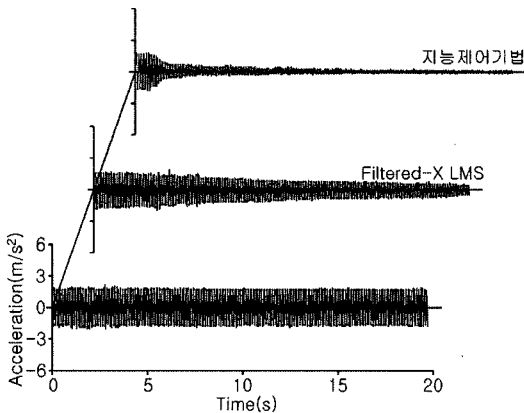
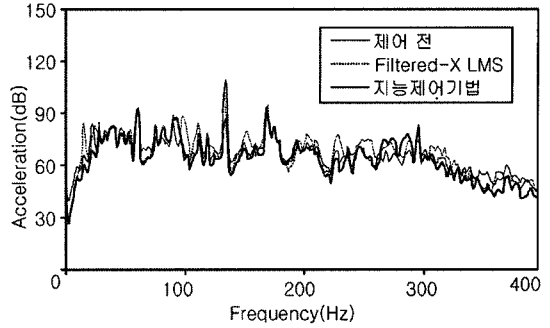
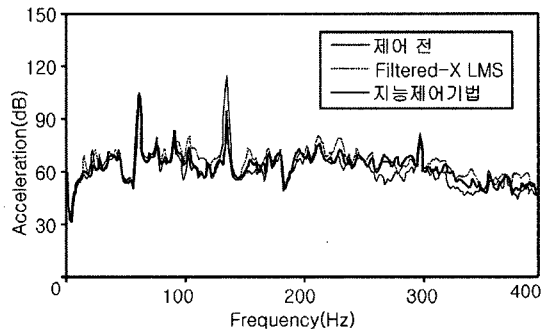


Fig. 7 Time trace of error sensor when excited by 135 Hz sinusoidal input



(a) error sensor position



(b) eference sensor position

Fig. 8 Frequency response of sensors when excited by 135Hz sinusoidal input

## 4. 결 론

본 연구에서는 정현파의 외란 입력을 받는 밀폐계의 평판에 Filtered-x LMS 알고리즘과 지능제어 기법을 이용하여 실시간 능동 진동제어를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 퍼지추론 방식에 의하여 역전파 알고리즘의 학습계수를 적응적으로 조정하는 지능제어 방식을 제안하고 이를 검증하였다.
- (2) 압전 재료인 피에조 세라믹과 제안한 지능제어기법을 이용하여 유연 평판의 저주파 진동 제어가 효과적으로 수행될 수 있는 제어기, 제어 시스템을 구성할 수 있었다.
- (3) 평판에 대한 정현파 음향가진 제어 결과로부터 제안한 지능제어 방식이 진동저감 효과 및 정착시간 등에서 기존의 Filtered-X LMS 기법보다 우수한 성능을 나타낼 수 있었다.

향후 1차 모드 이외의 모드에 대한 제어 성능을 향상시키기

위하여 다수의 오차센서 및 가진기를 이용한 다채널 제어방식으로서의 확장이 요구되며 랜덤 외란에 대한 실험적 검증도 필요할 것으로 생각된다.

### 참 고 문 헌

- (1) Oh, J. E., Lee, T. Y., Kim, H. S. and Shin, J., 1993, "The Active Noise Control in Harmonic Enclosed Sound Fields ( I )," *Journal of KSME*, Vol. 17, No. 5, pp.1054~1065.
- (2) Baz, A. and Pho, S., 1988, "Performance of an active control system with piezoelectric actuators," *Journal of Sound & Vibration*, Vol.5, No. 2, pp. 327~343.
- (3) Hong, S. Y., 1993, *Active vibration control of adaptive flexible structures using piezo- electric smart sensors and actuators*, Ph.D thesis of the Pennsylvania State University.
- (4) Shin, J., Kim, H. S., and Oh, J. E., 1994, "Active Control of Sound in a Duct System by Back Propagation Algorithm," *Journal of KSME*, Vol. 18, No. 9, pp. 1065~2271.
- (5) Han, S. H., 2002, "Intelligent Control Design of Mobile robot using Neural-Fuzzy Control Method," *Transaction of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 11, No. 4, pp. 62~67.
- (6) Lee, I. W., Park, W. S., Kim, D. H., Hahn, S. H., Seo, S. N., 2001, "Learning Rule of Neuro-Controller for Structural Control," *Journal of Korean Society of Civil Engineer*, Vol. 21, No .5, pp. 657~663.
- (7) Shin, J., Park, S. H., and Oh, J. E., 1997, "Active Vibration Control of the Flexible Cantilever Beam by Intelligent Control Technique," *Journal of KSAE*, Vol. 5, No. 2, pp. 205~212.
- (8) Park, S. H., 2000, 1998, *Active Control of Radiated Sound from Flexible Plate of Rectangular Enclosure using Multi-Channel Active Control Scheme*, Ph.D thesis of Hanyang University, pp. 50~86.
- (9) Simpson, P. K., 1990, *Artificial Neural Systems*, Pergamon Press, pp. 112~120
- (10) Lauterborn, W. and Parlitz, U., 1988, "Method of Chaos Physics and Their Application to Acoustics," *Journal of the Acoustic Society of America*, Vol. 84, No. 6, pp. 1975~1993.
- (11) Widrow, B. J. and Stearns, S. D., 1985, *Adaptive Signal Processing*, Prentice-Hall, pp. 251~274.