한국소음진동공학회 2001년도 춘계학술대회논문집, pp.302~307.

# 지능구조물 제어를 위한 적응형 PPF 제어기의 개발

이승범*, 0허 석**, 곽문규***

# Development of the Adaptive PPF Controller for the Vibration Syppression of Smart Structures

Seung-Bum Lee, Seok Heo, Moon K. Kwak

## Abstract

This research is concerned with the development of a real-time adaptive PPF controller for the active vibration suppression of smart structure. In general, the tuning of the PPF controller is carried out off-line. In this research, the real-time learning algorithm is developed to find the optimal filter frequency of the PPF controller in real time and the efficacy of the algorithm is proved by implementing it in real time. To this end, the adaptive algorithm is developed by applying the gradient descent method to the predefined performance index, which is similar to the method used popularly in the optimization and neural network controller design. The experiment was carried out to verify the validity of the adaptive PPF controller developed in this research. The experimental results showed that adaptive PPF controller is effective for active vibration control of the structure which is excited by either impact or harmonic disturbance. The filter frequency of the PPF controller can be tuned in a very short period of time thus proving the efficiency of the adaptive PPF controller.

## 1. 서 론

압전재료가 구조물과 결합된 제어 시스템을 일반적으로 지능구조물이라고 부른다. 지능구조물에 대한 해석은 간단한 보의 해석으로부터 출발한다. 압전재료를 포함한 지능구조물의 진동제어에 성공적으로 사용된 제어기중의 하나가 Fanson과 Caughy[1]가 제안한 PPF제어기, 곽[2-3]등이 제안한 MIMO PPF제어기, 곽[4]등이 제안한 PPF-SRF 혼합제어기, 곽[5]등이 제안한 수정LQG 제어기등이 있다. 이외에도 많은 제어기가 개발되어 실험으로 그 성능이 입증되고 있으며 실시간 적응 제어기의 구현을 위해서 허[6]등은 FFT알고리즘을 이용한 실시간 적응 PPF제어기를 개발하였고, 신[7]등은 유전자알고리듬을 이용한 SISO 시스템의 초기 가진에 대한 실시간 제어실험과 지속적인 강제가진에 대한 실시간 제어실험을 하였으며, 허[8]등은 유전자알고리듬을 이용하여 MIMO 시스템에 대한 실시간 적응 PPF제어기를 구현하였다.

본 논문에서는 구조물의 진동을 보다 효과적으로 제어하기 위하여 적응 PPF 알고리즘을 개발하였으며 이를 디지털화하여 구현하였다. 실험 결과 실시간 적응 PPF 알고리즘이 유효함이 입증되었다.

* First정보통신 연구원
** 동국대학교 기계공학과 대학원
*** 동국대학교 기계공학과 교수

## 2. 적응 PPF 제어 알고리듬

디지털 PPF 제어기에 대한 전달함수는 다음과 같이 표현된다[6].

$$H(z)=\frac{b_2z^2+b_1z+b_0}{z^2+a_1z+a_0} \tag{1}$$

여기서

$$\begin{aligned} b_2 &= \omega_f^2/\Delta,\ b_1=2\omega_f^2/\Delta,\ b_0=\omega_f^2/\Delta,\\ a_1 &= (2\omega_f^2-8/T^2)/\Delta\\ a_0 &= (4/T^2-4\zeta_f\omega_f/T+\omega_f^2)/\Delta,\\ \Delta &= (4/T^2+4\zeta_f\omega_f/T+\omega_f^2) \end{aligned} \tag{2}$$

이며 여기서 $T$는 샘플링 주기이며, 불안정을 일으키지 않을 정도로 빨라야 한다. 본 실험에서는 sampling rate이 20kHz까지 가능한 DSP board를 이용하여 샘플링 속도를 5kHz로 결정하였다. $\zeta_f$는 0.2의 감쇠율로 정하였고, $\omega_f$는 PPF 제어기의 필터주파수로서 일반적으로 제어하고자 하는 진동모드의 고유진동수에 맞추면 성공적으로 제어가 이루어지도록 되어 있다. 본 연구에서는 이 필터주파수를 효과적으로 찾을 수 있는 학습알고리듬을 개발하였으며 이를 PPF제어기에 연결하여 적응 PPF 제어기를 구현하였다.

구조물에 대한 상태 방정식은 일반적으로 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= Ax_k+Bu_k\\ y_k &= Cx_k \end{aligned} \tag{3}$$

여기서 $y_k$는 압전 감지기로부터 계측되는 값으로서 구조물의 변위에 비례한다. 따라서 다음과 같은 성능지수를 최소화하게 되면 능동진동제어가 이루어지게 된다.

$$E=\frac{1}{2}\sum_{k=1}^{m}y_k^2 \tag{4}$$

본 연구의 목적은 식(4)를 최소화하는 PPF 제어기의 필터주파수 $\omega_f$ 를 실시간으로 학습에 의해 구하는 방법을 개발하는 것이다. 이를 위해 최적화 기법에서 사용하고 있는 Gradient-Descent 방법을 사용하였다. 따라서 성능지수 $E$가 최소화되는 점을 찾아가는 식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\omega_f' = \omega_f - \alpha\frac{\partial E}{\partial \omega_f} \tag{5}$$

여기서 $\omega_f'$는 감지기에서 얻어진 값을 획득한 후 한 주기 다음에 적용할 새로운 필터 주파수를 나타낸다. 또한 $\alpha$ 는 수렴도를 조절하는 상수이다.

식(5)의 Gradient를 유도해 보면

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial \omega_f} &= \sum_{k=1}^{m} y_k\frac{\partial y_k}{\partial \omega_f}\\ &= \sum_{k=1}^{m} y_k C\frac{\partial y_k}{\partial \omega_f} \end{aligned} \tag{6}$$

이 식을 좀더 유도하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial \omega_f} &= \sum_{k=1}^{m} y_k C\left(A\frac{\partial x_{k-1}}{\partial \omega_f}+B\frac{\partial u_{k-1}}{\partial \omega_f}\right)\\ &= \sum_{k=1}^{m} y_k C\left[A\left(A\frac{\partial x_{k-2}}{\partial \omega_f}+B\frac{\partial u_{k-2}}{\partial \omega_f}\right)+B\frac{\partial u_{k-1}}{\partial \omega_f}\right]\\ &= \sum_{k=1}^{m} y_k C\left[A^2\left(A\frac{\partial x_{k-3}}{\partial \omega_f}+B\frac{\partial u_{k-3}}{\partial \omega_f}\right)+AB\frac{\partial u_{k-2}}{\partial \omega_f}\right.\\ &\qquad \left.+B\frac{\partial u_{k-1}}{\partial \omega_f}\right] \end{aligned} \tag{7}$$

식(7)을 살펴보면 Gradient 계산이 과거를 계속 거슬러 올라가 계산되어야 함을 알 수 있는데 이는 현실적으로 불가능한 알고리즘이다. 본 연구에서는 수치해석을 통해 Gradient가 다음 식에 비례함을 경험적으로 구할 수 있었다.

$$\frac{\partial E}{\partial \omega_f} \propto -y_k\frac{\partial u_{k-1}}{\partial \omega_f} \tag{8}$$

이제 필터주파수에 대한 제어력의 미분항을 구해보자. 식 (1)에 근거하면 $k-1$번째 제어력은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} u_{k-1} &= -a_1u_{k-2}-a_0u_{k-3}\\ &\quad +b_2(y_{k-1}+2y_{k-2}+y_{k-3}) \end{aligned} \tag{9}$$

따라서, 식(9)를 $\omega_f$ 에 관하여 편미분을 취하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_{k-1}}{\partial \omega f} &= -\frac{da_1}{d\omega_f}u_{k-2}-\frac{da_0}{d\omega_f}u_{k-3}\\ &\quad +\frac{db_2}{d\omega_f}(y_{k-1}+2y_{k-2}+y_{k-3}) \end{aligned} \tag{10}$$

여기서

$$\frac{da_1}{d\omega_f} = \left[4\omega_f\Delta-(2\omega_f^2-8/T^2)\frac{d\Delta}{d\omega_f}\right]$$

$$\frac{da_0}{d\omega_f} = [(-4\zeta_f/T+2\omega_f)\Delta - (4/T^2-4\zeta_f\omega_f/T+\omega_f^2)\frac{d\Delta}{d\omega_f}]/\Delta^2$$

$$\frac{db_2}{d\omega_f} = \left(2\omega_f\Delta-\omega_f^2\frac{d\Delta}{d\omega_f}\right)/\Delta^2 \qquad (11)$$

$$\frac{d\Delta}{d\omega_f} = 4\zeta_f/T+2\omega_f$$

이다. 따라서 새로운 필터 주파수 식은 따라서 다음과 같이 정리된다;

$$\omega_f' = \omega_f + \alpha y_k \frac{\partial u_{k-1}}{\partial \omega_f} \qquad (12)$$

본 연구에서는 식(12)를 실시간으로 적응 PPF 제어기가 변화하는 구조물의 특성에 대처하도록 하였다.

구조물에 대하여 적응 디지털 PPF 제어기를 적용하는 흐름도는 Fig. 1과 같다.

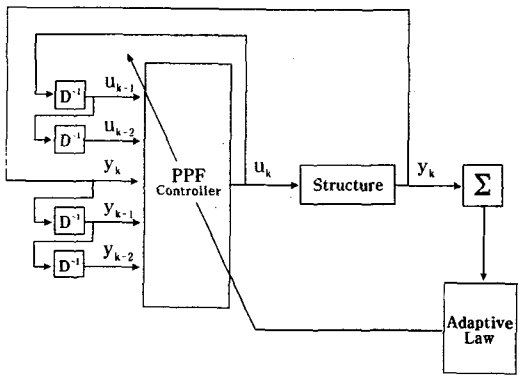


**Fig. 1 Block Diagram for Adaptive PPF Control**

## 3. 실험

본 연구에서 개발된 실시간 적응 디지털 PPF 제어기의 성능을 시험하기 위해 압전감지기와 압전작동기가 부착된 외팔보(Fig. 2)를 이용하였다. 제어 프로그램을 좀더 원활하게 활용하기 위해 주 제어 프로그램을 DSP에 다운로드하고 주 PC에서는 Matlab을 사용하여 다운로드 된 디지털 PPF 프로그램을 원격으로 조종하였다. 먼저 구조물을 가진하고 0.5초 후부터 실시간 적응 PPF 알고리즘에 의하여 제어된 데이터를 획득하고 후처리과정을 거치도록 하는 방법으로 초기 가진 형태의 교란과 Shaker를 이용한 지속적인 강제 교란에 대한 실험을 하였다.

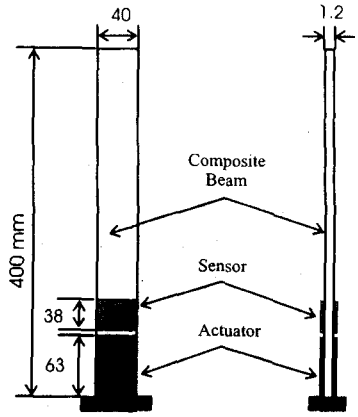


**Fig. 2 Schematic of Smart Structure**

Fig. 3는 구조물의 자유진동을 살펴본 것이다. 이것으로부터 구조물의 고유진동수가 11.25Hz 근방임을 알 수 있다.

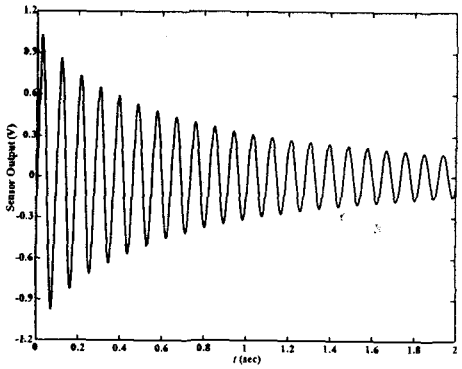


**Fig. 3 Free Vibration Response**

능동진동제어를 위해 PPF 제어기의 $\zeta_f$ =0.2, 파워앰프의 이득은 20으로 설정하였다. Fig. 4와 Fig. 5는 PPF 제어기의 필터주파수를 잘못 맞추었을 경우에 응답이 어떻게 되는지를 보여준다. 먼저 Fig. 7은 PPF의 제어 주파수 $\omega_f$를 5Hz로 조정한 다음 0.5초 후에 제어한 결과이며 Fig. 8은 $\omega_f$를 20Hz에 조정한 다음 0.5초 후에 제어한 결과이다. 그림으로부터 고유진동수보다 낮게 조정하였을 경우

능동진동제어효과가 거의 나타나지 않으며 높게 조정한 경우는 능동진동제어효과가 약간 나타나고 있음을 알 수 있다. 그러나 진동제어 성능이 만족스러운 것은 아니다.

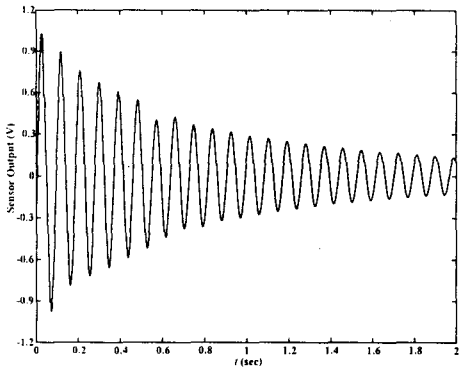


Fig. 4 PPF Controlled Response (tuned to 5 Hz).

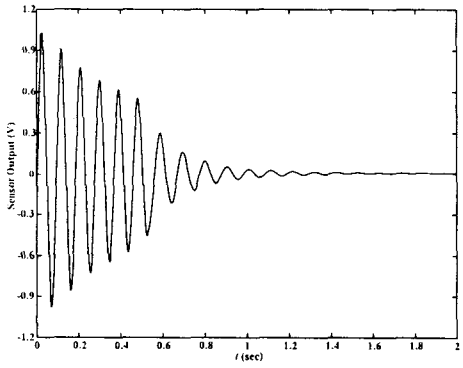


Fig. 5 PPF Controlled Response (tuned to 20.0 Hz).

구조물을 초기에 가진시키 후 적응 PPF 제어기를 구동하여 잘못 설정된 $\omega_f$로부터 어떻게 올바른 값을 찾아가는지 실험하였다. 여기서 적응 PPF 제어기의 학습비율, $\alpha$를 $20\times10^5$로 설정하였다. 학습비율에 따라 $\omega_f$로의 수렴도도 그만큼 달라지게 되는데 이 값이 너무 크면 발산할 수 있어 제어가 되지 않고 오히려 시스템이 불안정해질 수 있다. 반대로 값이 너무 작으면 수렴속도가 너무 늦어져 빠른 시간 내에 만족할 만한 제어 효과를 얻을 수 없다.

Fig. 6는 PPF 필터주파수를 5Hz에서 설정한 적응 PPF제어기를 구동시켜 진동응답이 어떻게 변화되는지를 보여준다. Fig. 7은 5 Hz로부터 시작하여 필터주파수가 고유진동수로 수렴해 감을 보여준다. 이 두 그림으로부터 적응알고르듬이 효과적으로 작용하여 PPF제어기가 필터주파수가 구조물의 고유진동수에 수렴하고 있음을 알 수 있다. 그 결과 진동제어가 성공적으로 이루어지고 있음을 알 수 있다.

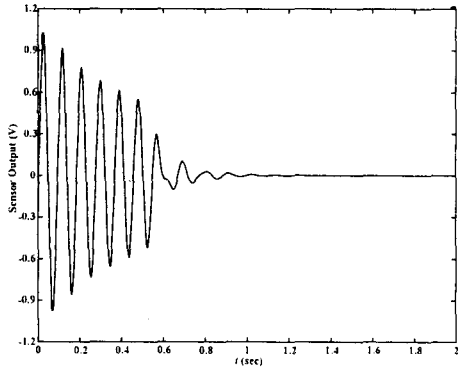


Fig. 6 Response by the Adaptive PPF Controller initially tuned to 5 Hz.

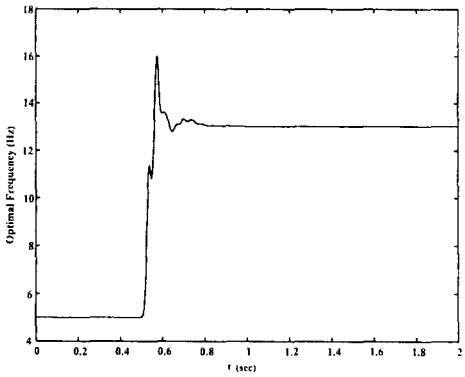


Fig. 7 Convergence of $\omega_f$ starting from 5 Hz

이제 PPF 필터주파수가 구조물의 고유진동수보다 높은 20Hz로 설정된 경우에 어떻게 필터주파수가 최적값으로 수렴해 가는 것을 살펴보자. Fig. 8은 초기 필터주파수 값 20Hz를 갖는 적응 PPF제어기를 구동했을 경우 구조물의 응답이 어떻게 변화하는지를 보여주고 있다. 그리고 Fig. 9는 20 Hz로부터 시작한 필터주파수가 시간이 지남에 따라 어떻게 변화하는지를 보여주고 있다. 이 경우에도 앞

의 Fig. 6과 7와 동일하게 적응 PPF 제어기가 성공적으로 작동하고 있음을 알 수 있다. 두 그림 모두 PPF제어기가 가동한 후 약 0.5초만에 진동이 제압되었음을 보여주고 있다.

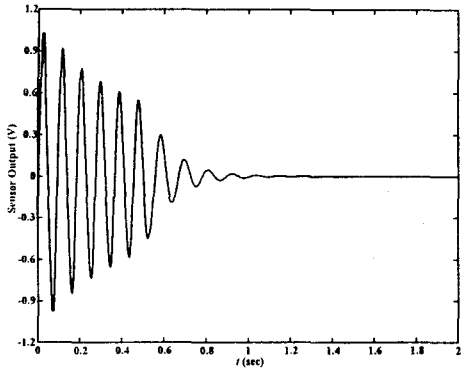


**Fig. 8 Response of the Beam starting from 20 Hz by the adaptively tuning PPF controller in real-time.**

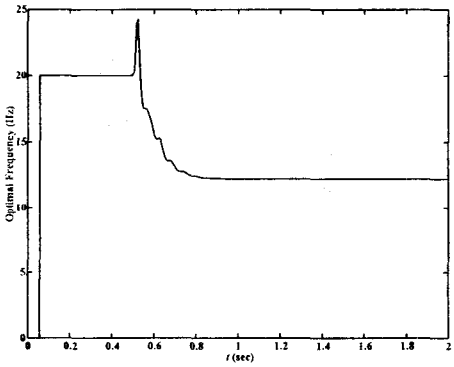


**Fig. 9 Convergence of $\omega_f$ starting from 20.0 Hz**

기계 구조물에서 발생하는 진동은 초기 가진 형태의 외부 교란이 가해지는 경우보다 지속적으로 가해지는 경우가 더 많다. 또한 기계구조물에 가해지는 외부 교란은 지진과 같은 확률분포적인 가진을 제외하면 대부분 조화 성분을 가지게 된다. 이러한 외부 교란에 적절히 대응하기 위해서는 구조물의 감쇠만을 증가시키는 것만으로는 부족하며 외부 교란을 상쇄할 수 있는 제어기의 설계가 필요하다.

본 연구에서 개발한 적응 PPF 제어기를 외부 조화 교란의 강제진동에 있어서 어떻게 대응하는지를 살펴보았다. 앞의 경우와 마찬가지로 적응 PPF 제어기에 임의의 초기값을 부여하고 학습알고리듬에 의해 최적값을 찾도록 하였다. Fig. 10은 초기 필터주파수 5 Hz에 맞추어진 PPF제어기가 학습알고리듬을 통해 외부 조화 교란에 대응해 가는 결과를 보여주고 있다. 또한 Fig. 11은 초기 필터주파수 20 Hz에 맞추어진 PPF제어기가 학습알고리듬을 통해 외부 조화 교란에 대응해 가는 결과를 보여주고 있다. 두 그림 모두 진폭이 1/6 수준으로 감소되었음을 알 수 있다.

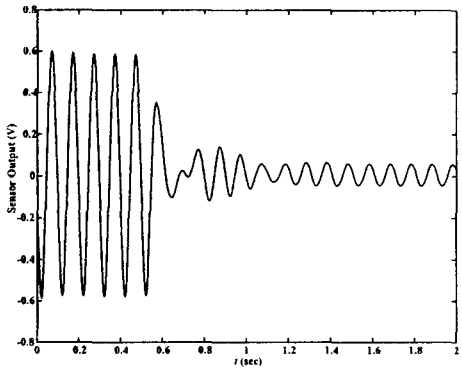


**Fig. 10 Forced Response of the Beam starting from 5.0 Hz by the adaptively tuning PPF controller in real-time.**

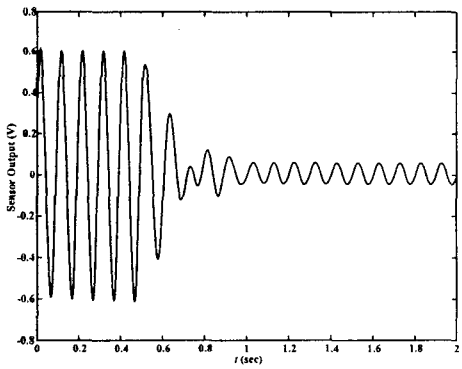


**Fig. 11 Forced Response of the Beam starting from 20.0 Hz by the adaptively tuning PPF controller in real-time.**

Fig. 12는 Fig. 11에 보이는 실험에서 작동기에 가해진 전압을 나타내고 있다. 제어보드의 성격상 Fig. 12에 보이는 값이 먼저 10배로 증폭되고 이것이 다시 앰프를 거치면서 20배로 증폭되기 때문에 압전작동기에 가해진 최대 전압은 160 V 정도가

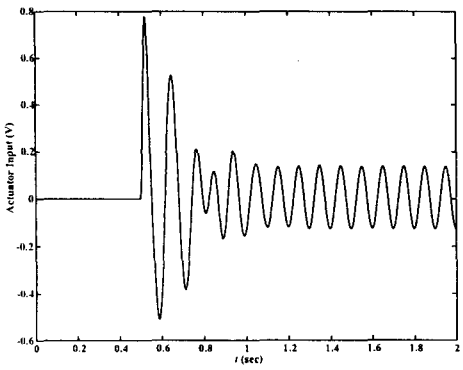


**Fig. 12 Actuator Input Voltage.**

## 4. 토의 및 결론

본 논문은 실시간 적응 PPF 제어 알고리즘을 이용한 지능구조물의 실시간 능동진동제어의 방법에 대하여 다루고 있다. PPF제어기의 단점을 보완하기 위해서 고유진동수에 대한 필터 주파수를 실시간으로 학습하는 방법을 제안하였으며 구조물에 대한 적응제어가 효과적으로 가능함을 실험으로 입증하였다.

본 연구에서는 PPF 제어기의 필터 주파수를 실시간으로 보정하는 알고리즘을 먼저 개발하였다. 실제로는 최적설계와 신경망 제어기 설계에 가장 많이 사용되고 있는 Gradient-Descent 방법을 적용하였다.

어떤 주어진 시간 내에 진동을 효과적으로 제어하기 위해서는 성능지수를 먼저 정의해야 하는데 본 연구에서는 감지기 값의 제곱의 합을 성능지수로 설정하고 이에 대한 Gradient를 유도하였는데 수치해석결과를 바탕으로 경험식을 제안하였다. 이렇게 얻어진 학습 알고리즘과 PPF 제어기를 동시에 적용하여 실시간 적응형 PPF 제어기를 구현하였다.

실험결과 짧은 시간에 주어지는 외부 충격에 의하여 가진 되는 구조물 진동의 능동진동제어뿐만 아니라 지속적인 외부 교란이 가해지는 구조물 진동의 능동진동제어로서 적응 PPF 제어기가 효과적임을 확인하였다. 따라서 본 연구에서 개발한 적응 PPF 제어기가 실용적으로 타당함을 입증하였다.

본 연구에서는 감지기와 작동기가 각각 한 개씩인 SISO 제어시스템을 고려하였는데 향후 MIMO 제어시스템에 대해서도 적응 PPF 제어기의 적용이 가능할 것으로 예상한다. 또한 학습알고리즘을 개선하면 보다 신속하게 변화하는 시스템에 대처할 수 있을 것으로 예상된다.

## 후 기

본 연구는 국방과학연구소 위탁과제(UD000038ED) 지원에 의하여 이루어졌다. 관계자 여러분께 감사드린다.

## 참 고 문 헌

[1] Fanson, J.L. and Caughey, T.K., 1987, "Positive Position Feedback Control for Large Space Structures," AIAA Journal, Vol. 28, No. 4, April 1990, pp. 717-724

[2] 곽문규, "압전재료를 이용한 지능구조물의 능동진동제어", 한국소음진동공학회지, 제 5권 제 3호, 1995년 9월, pp. 292-302.

[3] 라완규, 곽문규, 윤광준, "압전감지기와 작동기를 이용한 복합재료 격자구조물의 능동진동제어", 한국항공우주학회지, 제25권, 제5호, 1997, pp. 76-85.

[4] 곽문규, 라완규, 윤광준, "PPF와 SRF 조합제어기법을 사용한 지능구조물의 능동진동제어," 한국소음진동공학회지, 제7권 제5호, 1997, pp. 811-817.

[5] 곽문규, "지능구조물의 능동진동제어를 위한 다중 PPF 제어기와 수정 LQG 제어기의 비교 연구", 한국소음진동공학회지, 제 8권 제 6호, 1998, pp. 1121-1129.

[6] 허석, 곽문규, "FFT 알고리즘을 이용한 실시간 적응 PPF 제어기의 개발", 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, 1998, pp. 799-804.

[7] 신태식, 곽문규, "유전자알고리듬을 이용한 능동진동제어기의 실시간 조정" 한국소음진동공학회지, 제10권, 제6호, 2000, pp. 1083-1093.

[8] 허석, 곽문규, "유전자알고리듬을 이용한 지능구조물의 PPF 제어기 실시간 다중변수 조정", 한국소음진동공학회지, 제11권, 제1호, 2001, pp. 147-155