한국소음진동공학회지 제 7 권 제 5 호, pp. 811~817, 1997.

〈논 문〉

PPF 와 SRF 조합제어기법을 사용한 지능구조물의 능동진동제어

Vibration Suppression of Smart Structures Using a Combined PPF-SRF Control Technique

곽 문 규* · 라 완 규** · 윤 광 준**
Moon K. Kwak, Wan-Kyu Ra and Kwang-Joon Yoon

(1997년 6월 13일 접수 ; 1997년 9월 12일 심사완료)

Key Words : Active Vibration Control(능동진동제어), Grid Structure(격자구조물), Piezoceramic(압전세라믹), PPF, SRF

ABSTRACT

This paper is concerned with the active vibration controller design for the grid structure based on the positive position feedback(PPF) and the strain rate feedback(SRF) control. A new control methodology by the combination of the PPF and SRF control can suppress all the modes of the structure theoretically and can be easily implemented with analog circuits. The underlying concept for the design of the new controller is that the SRF controller stabilizes the modes higher than the second mode and the PPF controller stabilizes the fundamental mode which is destabilized by the SRF controller. In order for the new controller to be implemented successfully, the collocated control is necessary. To this end, the piezoceramic sensor and actuator are located as close as possible, thus realizing the nearly collocated control. The combined PPF and SRF controller proves its effectiveness by experiments.

1. 서 론

구조물의 진동은 구조물의 동력원에서 발생하는 불균형력이나 외부에서 작용하는 힘에 의해 발생하는데 대부분의 경우에 바람직하지 못한 결과를 초래한다. 특히 외부가진력의 진동수가 구조물의 고유진동수와 같아지는 경우 즉, 공진 상태가 발생할 경우에는 적은 힘으로도 구조물이 손상될 수 있다. 따라서 공진회피가 진동제어 방법의 주류를 이루고 있으며 공진회피가 불가능할 경우 진동흡수장치나 감쇠재료를 이용한 수동진동제어 방법을 모색하는 것이 일반적이다. 감쇠재료를 이용하여 감쇠를 증가시키는 경우에 공진상태의 진폭이 감소하게 되는데 감쇠는 에너지 손실을 기계적인 성질로 표시한 것으로 내부 마찰 또는 열, 소리의 형태로 에너지가 방출되는 현상을 가리킨다. 따라서 감쇠가 큰 재료를 사용하면 기계적인 에너지를 흡수하거나 차단하게 되어 수동적인 진동제어를 이룰 수 있다.

최근에 연구가 활발히 진행되고 있는 능동진동제어는 수동적인 진동제어로 진동억제가 불가능한 경우에 사용되는 방법으로써 구조물에 감지기(sensor)와 작동기(actuator)를 부착하여 진동을 능동적으

* 정회원, 동국대학교 공과대학 기계공학과
** 건국대학교 공과대학 항공우주공학과

로 제어하는 방법을 말한다. 이와 같이 감지기와 작동기, 제어회로를 지니고 있는 구조물을 지능 구조물 (intelligent structure 또는 smart structure) 이라고 칭하는데 본 논문에서는 압전세라믹을 이용한 능동진동제어를 다루고자한다.

그 동안 수행된 능동진동제어 연구결과를 살펴보면 실제 하드웨어 측면보다는 제어기법에 관한 이론적인 해석이 대부분인 것을 알 수 있다. 본 논문에서는 실제 지능구조물에 바로 적용할 수 있는 제어기법을 개발하고 이를 실제 구조물에 구현하여 실용성을 입증하고자 한다. 본 논문에서 고려한 구조물은 압전세라믹 감지기와 작동기가 부착된 복합재료 격자구조물로서 우주구조물의 태양판 구조물과 유사하다. 복합재료 격자구조물은 이차원 구조물로서 그 동안의 주 연구대상이었던 간단한 보구조물과 비교하여 진동특성이 복잡하며 고차의 진동모드를 제어할 수 있는 제어기의 설계도 용이하지 않다. 이와 같이 복잡한 구조물의 진동제어를 위하여 본 논문에서는 PPF (positive position feed -back) 제어방법과 SRF(strain rate feed-back) 제어방법을 조합하여 두 제어기의 장점을 모두 취할 수 있는 새로운 제어기를 개발하였다.

압전재료가 보구조물과 결합된 시스템에 대한 능동진동제어는 Crawley 등[1,2] Hanagud 등[3]의 연구로부터 시작되었는데 이외에도 보구조물, 평판, 박판구조물, 복합재평판등에 대한 모델화기법과 제어기법이 여러 논문[4-6]에서 활발하게 토의되었다. 압전작동기와 감지기를 사용한 능동진동제어에 관한 논문들에 대해서는 곽[17]의 논문에서 자세히 다루고 있다. 제어기법 중 실제 구조물에 성공적으로 사용된 제어기법은 Fanson 과 Caughey[18]가 개발한 PPF 제어 기법인데 PPF 제어기법은 특정한 진동모드를 선별하여 제어할 수 있다는 장점이 있다. PPF 제어기를 확장하여 IMSC (independent modal space control) 개념에 입각한 modal positive position feedback 제어 기법[19]의 사용이 제안되었으며 Denoyer 와 Kwak[20] 는 PPF 제어이론을 사용하여 여러 모드를 동시에 제어하는 방법을 제시하였다.

표현 자체가 간단하며 일종의 능동 감쇠 제어로 간주할 수 있는 직접 속도 되먹임(direct velocity feedback) 제어방법이 있다[22]. 직접 속도 되먹임 제어 방법은 작동기와 감지기가 같은 위치에 놓이는 경우 이론적으로 반드시 안정적이다. 그러나 이러한 직접 속도 되먹임 제어 방법은 라플라스 영역에서 일직선으로 증가하며 따라서 고주파수 영역에 소음이 포함되는 경우 소음이 크게 증폭하게 된다. 제어

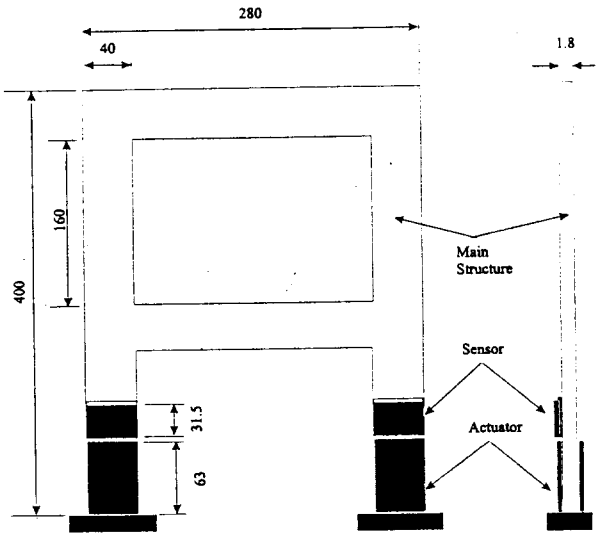


Fig. 1 Schematic of grid structure

기의 표현식 자체는 간단하지만 실제 적용시 고주파수 소음이 이와 같이 증폭되기 때문에 저주파수 통과필터에 연결하여 사용하여야만 한다. 이 경우 제어기 자체의 회로가 복잡해지기 때문에 실용성이 떨어지게 된다. 직접속도되먹임제어기를 보다 쉽게 적용할 수 있는 형태로 고친 제어기가 SRF 제어기이다. SRF 제어이론의 회로구성 및 특성은 Bronowicki 등[21] 의 short course note 에 자세히 설명되어 있는데 이 방법은 여러 모드를 동시에 제어하는데 효과적이다. 그러나 제어하지 않는 모드들을 불안정하게 만드는 단점이 있어 SRF 제어 방법은 PPF 제어방법에 비하여 많이 활용되고 있지 않다.

본 논문에서는 외팔보보다 진동특성이 복잡한 복합재 격자구조물 (Fig. 1)을 대상으로 하여 탄성구조물의 능동진동제어 방법을 논하였는데 특정한 모드를 선택적으로 제어할 수 있는 PPF 제어기의 장점과 여러 모드를 동시에 제어할 수 있는 SRF 제어기의 장점을 조합하여 새로운 제어기를 개발하였다. 새로운 제어기를 복합재 격자구조물의 능동진동제어에 적용한 결과 우수한 제어효과를 얻을 수 있음을 확인할 수 있었다.

2. PPF 와 SRF 혼합제어기의 설계

앞에서 설명하였듯이 많은 종류의 제어 기법들이 지능 구조물에 성공적으로 적용되었지만 실제 적용면에서 가장 성공적인 PPF 제어[18,20]기법을 간략하게 설명하고자 한다.

PPF 제어는 일반 변위를 계측하여 진동을 억제

하는 방법인데 다음과 같은 장점들을 지니고 있다. 먼저 감쇠를 증가시키고자 하는 주파수 영역을 확실하게 제어할 수 있는데 즉, 특정한 고유 진동 모드를 선택하여 제어할 수 있다. 또한 감쇠를 주고자하는 주파수 영역의 이득이 높기 때문에 안정성이 높고 OP Amp를 이용한 아날로그 회로로 쉽게 구현이 가능하며 spillover 에 덜 민감하고 작동기의 동적 거동에 의해 불안정해지지 않는다는 장점이 있다. 그러나 고유진동모드들이 서로 근접한 경우에는 적용하는데 어려움이 있으며 구조물의 고유진동수를 정확히 알아야 하고 저주파수 대역에서 탄성력을 저하하여 정적불안정을 초래할 수 있다는 단점이 있다. 일반적으로 PPF 제어기는 구조물의 기본 진동모드를 제어하는데 가장 효과적이라고 말할 수 있다. 따라서 PPF 제어기는 기본진동수를 포함한 저차 모드의 제어에 주로 사용되어왔다.

PPF 제어 보상 회로의 전달함수는 다음과 같이 되는데

$$H(s)=\frac{\omega_f^2}{s^2+2\zeta_f\omega_f s+\omega_f^2} \qquad (1)$$

여기서 ζ_f 와 ω_f 는 PPF 제어 보상회로의 점성 감쇠계수와 고유진동수를 나타낸다. 이식은 결국 저주파 통과 필터(low-pass filter)와 같은 형태로 됨을 쉽게 알 수 있다. 따라서 OP amp가 포함된 아날로그 회로 (Fig. 2)를 이용하여 쉽게 구현할 수 있다. Fig. 2 에 보이는 저주파통과필터의 출력전압과 입력전압의 비는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\frac{V_o}{V_i}=\frac{\frac{1}{R_1R_2C_1C_2}}{s^2+\frac{C_2(R_1+R_2)}{R_1R_2C_1C_2}s+\frac{1}{R_1R_2C_1C_2}} \qquad (2)$$

식 (1) 과 (2)를 비교하여 보면 다음과 같은 식을 유도할 수 있다.

$$\omega_f=\sqrt{\frac{1}{R_1R_2C_1C_2}}$$
$$\zeta_f=\sqrt{\frac{C_2(R_1+R_2)^2}{4R_1R_2C_1}} \qquad (3)$$

이와 같은 저주파통과필터는 코너주파수에서 위상이 90도로 바뀌게 되는데 구조물의 감쇠에 의한 영향이 변위와 90도 위상차로 나타나는 것을 고려한다면 코너주파수를 제어하고자하는 구조물의 고유진동수에 일치시킬 경우에 감쇠가 인위적으로 증가된 효과를 얻을 수 있게 된다.

격자구조물에 대하여 FFT 신호분석기 (HP

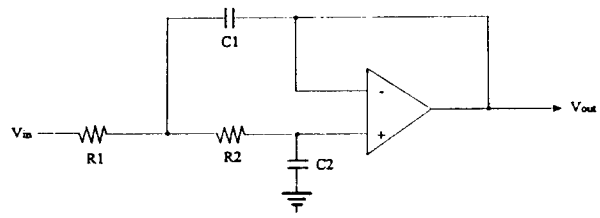


Fig. 2 PPF Controller Circuit

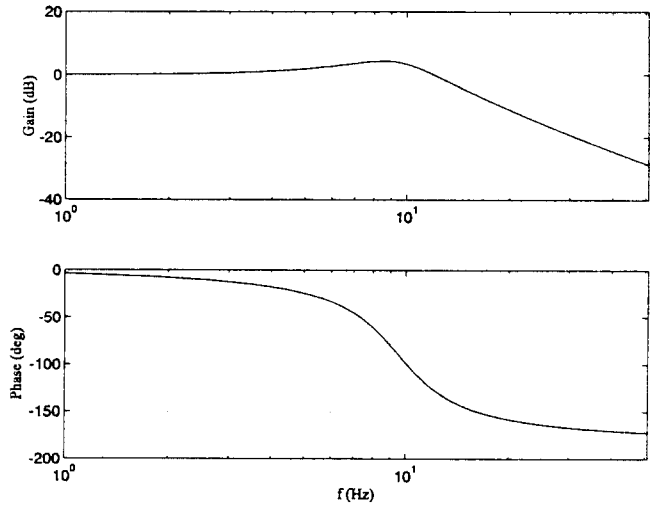


Fig. 3 Frequency Responses of PPF Con-troller for the First Bending Mode

3567 0A)를 이용하여 진동실험을 수행한 결과 최저차 진동모드는 굽힘진동모드이며 고유진동수는 9.5Hz 가 됨을 확인할 수 있었다. 따라서 1차의 굽힘모드에 대한 PPF 제어기의 구현을 위하여 R1=5MΩ, R2=1MΩ의 가변저항, C1=68nF, C2=2nF 의 값을 사용하였다. 가변저항을 사용한 이유는 저항과 축전지의 실제 값이 약간 차이가 나기 때문에 가변저항을 이용하여 코너주파수를 정확히 9.5 Hz에 맞추어야 했기 때문이다. Fig. 3은 1차의 굽힘모드제어를 위한 PPF 제어기의 주파수응답을 보여주고 있는데 9.5 Hz에서 위상이 90도가 됨을 확인할 수 있다. Fig. 3에서 보이는 바와 같이 저주파통과필터의 이득은 코너주파수를 지나면서 급격히 감소하게 되어 고차모드로의 Spillover 가 감소된다. 그러나 코너주파수보다 작은 주파수내에서는 정적 불안정이 발생할 수 있다.

SRF 제어기[21]는 일반변위를 시간에 대해 한번 미분한 일반 속도를 제어기로 입력하여 진동을 억제하는 방법인데 다음과 같은 장점을 가지고 있다. 먼

저 PPF 제어기법이 선별된 하나의 모드를 제어하는데 비하여 SRF 제어기법은 넓은 주파수 영역에 걸친 여러 개의 진동모드를 동시에 제어할 수 있으며 OP amp를 이용하여 쉽게 구현된다. 단점은 제어주파수 밖에서는 음의 감쇠 효과를 주기 때문에 불안정해질 수 있다는 것이다. SRF 제어기법을 설명하기 위하여 다음과 같은 구조물의 1자유도계 운동방정식을 고려하여 보자.

$$\ddot{\eta} + 2\zeta\omega\dot{\eta} + \omega^2\eta = g\omega^2\xi \qquad (4)$$

여기서 ξ 는 SRF 제어 보상회로의 출력을 나타낸다. SRF 제어보상회로식은 구조물의 운동방정식과 비슷한 형태로 다음과 같이 주어진다.

$$\ddot{\xi} + 2\zeta_f\omega_f\dot{\xi} + \omega_f^2 = \omega_f^2\ddot{\eta} \qquad (5)$$

여기서 ζ_f 와 ω_f는 SRF 제어보상회로의 감쇠계수와 고유진동수를 나타낸다. PPF 제어기와는 달리 제어기 입력이 일반속도로 표현되어 있는 것을 발견할 수 있을 것이다. 이와 같은 보상회로의 전달함수는 다음과 같이 되는데,

$$H(s) = \frac{s\omega_f^2}{s^2 + 2\zeta_f\omega_f s + \omega_f^2} \qquad (6)$$

이식은 밴드 통과 필터(band-pass filter)와 같은 형태로 됨을 쉽게 알 수 있으며 직접속도되먹임제어기에 저주파수통과필터를 연결한 경우로도 볼 수 있다. 이와 같은 전달함수를 갖는 SRF 제어 보상회로는 PPF 제어보상회로와 동일하게 OP amp를 포함한 간단한 아날로그회로 (Fig. 4)로 구현할 수 있다.

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{\dfrac{-1}{R_1C_1}}{s^2 + \dfrac{(C_1+C_2)}{R_3C_1C_2}s + \dfrac{R_1+R_2}{R_1R_2R_3C_1C_2}} \qquad (7)$$

식 (6) 과 (7)을 비교하여 보면 다음과 같은 식을 유도할 수 있다.

$$\omega_f = \frac{1}{\sqrt{R_3C_1C_2}}\sqrt{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} \qquad (8)$$

$$\zeta_f = \frac{1}{2}\frac{\sqrt{\dfrac{C_2}{C_1}} + \sqrt{\dfrac{C_1}{C_2}}}{\sqrt{R_3\left(\dfrac{1}{R_1} + \dfrac{1}{R_2}\right)}}$$

SRF 제어기는 구조물의 zero에 코너주파수를 맞추고 코너주파수 이하의 고유진동모드를 제어하는 것이 일반적이다. 그러나 본 논문에서는 2차 이상의 모드를 SRF 제어기로 제어하는 방법을 선택하였는데 이러한 SRF 제어기의 구현을 위하여 inverter

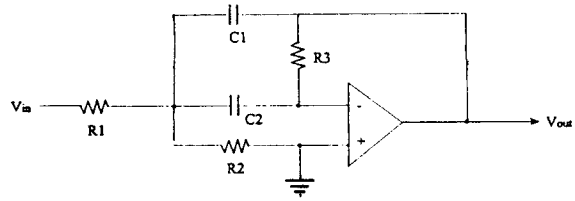


Fig. 4 SRF controller circuit

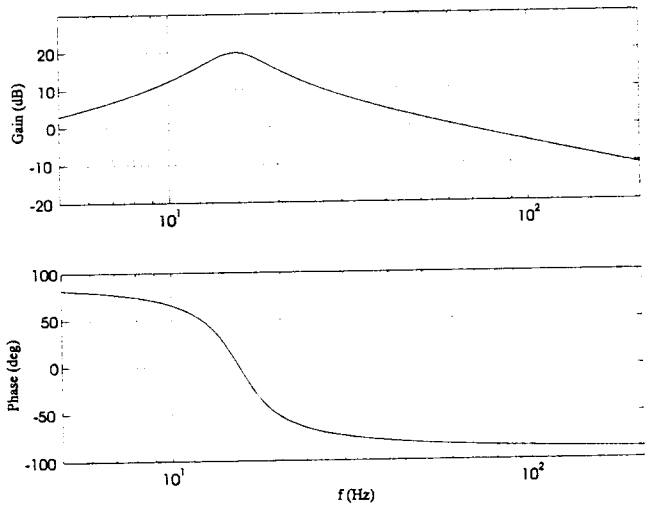
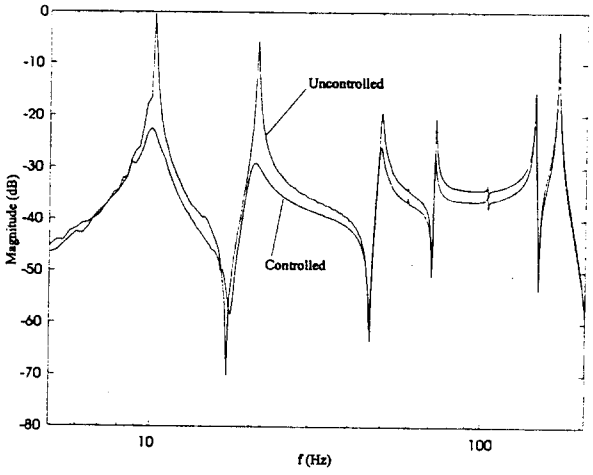


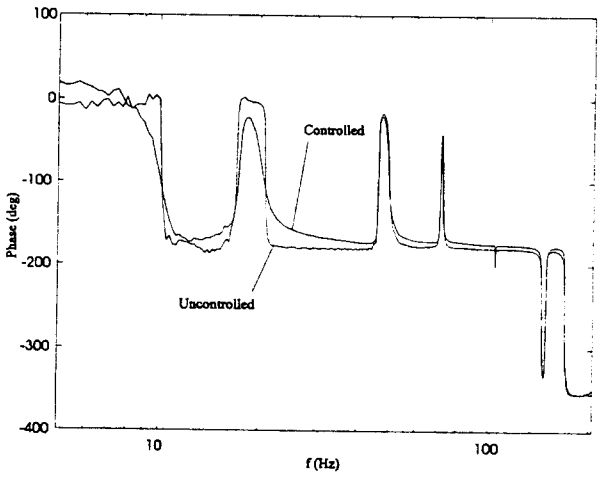
Fig. 5 Frequency response of SRF controller

회로를 삽입하고 기존의 SRF 제어기와 연결하는 방식으로 제어기를 설계하였다. 이와 같은 SRF 제어기와 PPF 제어기를 조합하면 기본진동모드는 SRF 에 의해 불안정해질 수 있지만 PPF 제어기의 안정화 효과가 더 커 기본 진동모드가 제어되게 되고 2차 이상의 고차모드는 SRF 제어기에 의해 제어된다. PPF 제어기는 앞에서 설명한 바와 같이 코너주파수를 넘어서면서 이득이 급격히 감소하기 때문에 SRF 제어기에 의해 제어되는 고차모드에 별 영향을 미치지 않는다. 따라서 본 논문에서 제안한 PPF-SRF 혼합제어방법을 사용하면 이론상 모든 모드를 제어할 수 있다. 그러나 SRF 제어기의 영향력이 고차로 갈수록 감소하기 때문에 실제로는 고차모드를 모두 제어할 수 없다. 이러한 PPF-SRF 혼합제어기의 장점은 전체적인 불안정이 존재하지 않는다는 것이다.

격자구조물에 대하여 2차 이상의 진동모드를 SRF로 제어하기 위해 두 번째 zero에 해당하는 16Hz에 SRF의 코너주파수를 일치시켰는데 사용된 저항과 정전기 용량 값들은 다음과 같다.



(a) Magnitude



(b) Phase

Fig. 6 Frequency response of the PPF-SRF combined control

$R_1 = 1\,M\Omega$, $R_2 = 5\,K\Omega$ $R_3 = 2M\Omega, C_1 = C_2 = 100nF$

Fig 4는 이와 같이 구현된 SRF 제어 보상회로의 주파수 응답을 보여주는데 Fig. 5에서 보여지는 바와 같이 코너주파수보다 높은 주파수에서는 위상차가 90도로 되어 감쇠효과를 주고 반대로 코너주파수보다 낮은 주파수에서는 음의 감쇠효과, 즉, 불안정해짐을 알 수 있다.

3. 실험 결과

Fig. 1 과 같은 복합재 격자구조물은 연속적인 구조물로서 무한개의 고유진동수와 고유모드를 가지고있어 유한개의 작동기와 감지기로 이들을 모두 제어하는 것은 사실상 불가능한데 두 쌍의 압전감지기와 작동기를 사용하여 가능한 많은 수의 진동모드를 제어하고자 본 논문에서 개발한 PPF-SRF 혼합제어기를 적용하였다. 각각의 SRF 제어기와 PPF 제어기는 독립적으로 작동하여 비중앙화제어기를 구현하게 되며 기본 진동모드인 굽힘모드는 PPF 제어기로 제어하고 2차의 비틀림모드부터 고차의 진동모드는 SRF 제어기를 사용하여 제어하였다. 따라서 앞에서 설명한 바와 같이 PPF 제어기의 코너주파수는 기본진동수인 9.5Hz 에 맞추어 기본 진동모드를 제어하고 SRF 제어기의 코너 주파수는 두 번째 영점인 16Hz에 맞추어 고차모드를 제어하도록 설계하였다.

Fig. 6은 PPF-SRF 혼합제어기를 적용한 실험결과를 제어를 적용하지 않은 결과와 비교하여 보여주고 있다. Fig. 6 으로부터 PPF-SRF 혼합제어기가 1차와 2차 모드뿐만이 아니라 그 이상의 고차모드까지 제어를 하고 있음을 알 수 있어 본 연구에서 제안한 제어기가 그 성능이 우수함을 입증하고 있다. 그러나 고차모드로 올라갈수록 제어효과는 감소된다.

이와 같은 PPF-SRF 혼합제어기의 적용에 있어 가장 큰 어려움은 각각의 제어기에 대한 이득 결정이다. 본 연구에서는 PPF 제어기의 이득을 5에 고정하고 SRF 제어기의 이득을 서서히 올려가며 전체적으로 가장 안정적인 상태를 얻을 수 있는 이득을 실험적으로 구하였다. 실험에서 감지기는 전하증폭기에 연결되어 있으며 감지기의 이득은 전하증폭기의 저항과 축전기의 값에 의하여 결정된다. 일반적으로 감지기와 작동기의 이득에 관해서는 이론적인 연구에서 고정된 상수값으로 취급하는 경향이 있으나 실제 적용시 이 값은 상당히 변동적이다. 따라서 본 연구에서는 PPF 와 SRF 에 대한 이론적인 근거를 배경으로 실험적으로 이를 구현하는 방법을 사용하였다.

4. 토의 및 결론

본 논문에서는 보구조물에 비하여 좀더 복잡한 복합재 격자구조물을 대상으로 보다 효율적인 능동진동 제어기의 설계방법을 논하였다. 본 논문에서 고려한 복합재 격자구조물은 진동특성이 복잡하여 압전감지기와 압전작동기를 이용한 능동진동제어기 설계에 있어 어려움이 있다. 압전감지기와 압전작동기의 위치가 근접해 있어 준동위치제어를 구현하고 있어 직접 속도 되먹임 제어를 적용할 경우 이론적

으로 거의 모든 모드가 제어될 수 있다고 말할 수 있다. 그러나 직접 속도 되먹임 제어기를 실제로 적용하는 경우에 고주파수 소음이 증폭되는 경향이 있어 저주파수 통과필터와 연결하여 사용하여야 한다. 따라서 모든 모드를 제어한다는 것은 불가능하다.

탄성구조물의 진동특성은 최저차 기본진동모드가 다른 모드들에 비하여 우세하며 고차모드로 올라갈수록 감쇠의 영향으로 그 영향력이 약화된다. 이러한 관찰 하에 일반적으로 저차의 몇 개 진동모드를 제어하는 것이 일반적이다. PPF 제어기는 개개의 모드를 선택적으로 제어할 수 있어 이와 같은 경우에 매우 적합하다. 그러나 많은 모드를 제어하는 경우에 같은 수만큼의 PPF 제어기가 필요하게 되기 때문에 많은 모드를 제어하는 경우에는 적용하기가 곤란하다. 많은 모드를 제어할 수 있는 직접속도되먹임제어의 개념을 실제로 적용하기 위하여 도입된 제어기가 SRF 제어기인데 제어 영역 밖의 모드를 불안정하게 만들 수 있기 때문에 그 적용이 제한되어 있다. 일반적으로 SRF 제어기의 적용은 고차모드가 자연감쇠가 제어기의 음의 감쇠효과로 불안정해지지 않는 범위 내에서 사용한다.

본 논문에서는 특정모드를 선별적으로 제어할 수 있는 PPF 제어기를 기본 진동모드에 적용하여 제어하고 넓은 범위에 걸쳐 진동제어효과를 줄 수 있는 역 SRF 제어기를 2차 이상의 모드에 적용하여 이론상 모든 모드를 제어할 수 있는 제어기를 제안하였다. 이와 같은 PPF-SRF 혼합 제어기를 실제 구조물인 복합재 격자구조물에 적용한 결과 그 성능이 입증되었는데 OP amp를 포함한 아날로그회로로 구현이 가능하여 앞으로 실제적인 진동제어문제 해결에 큰 도움이 될 것으로 예상된다.

본 논문에서 제안한 PPF-SRF 혼합제어기는 비중앙화 제어기로서 탄성구조물에 적용되었는데 중앙화 개념의 제어기 설계도 논의해 보아야 될 것으로 예상되며 최적 제어 상태를 이룰 수 있는 PPF 제어기의 이득과 SRF 제어기의 이득 결정방법에 관한 이론적 연구가 필요하다. 또한 이러한 제어기의 디지털 화도 앞으로 다루어야 할 주제라고 생각된다.

후 기

본 연구는 '96년도 한국과학재단의 핵심전문연구과제 (과제번호 961-1001-003-2)의 일부 지원을 받아 수행되었으며 관계자 분들께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

(1) Crawley, E.F. and de Luis, J., 1987, "Use of Piezoelectric Actuators as Elements of Intelligent Structures," AIAA Journal, Vol. 25, No. 10, pp. 1373~1385.

(2) Crawley, E.F. and Anderson, E.H., 1990, "Detailed Models of Piezoceramic Actuation of Beams," Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 1, No. 1, pp. 4~25.

(3) Hanagud, S., Obal, M.W., and Calise, A.J., 1992, "Optimal Vibration Control by the Use of Piezoceramic Sensors and Actuators," Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 15, No. 5, pp. 1199~1206.

(4) Banks, H.T. and Smith, R.C., 1993, "The Modeling of Piezoceramic Patch Interactions with Shells, Plates and Beams," NASA Contractor Report, pp. 1~31.

(5) Hagwood, N.W., Chung, W.H., and von Flotow, A., 1990, "Modelling of Piezoelectric Actuator Dynamics for Active Structural Control," Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 1, No. 3.

(6) Kwak, M.K., Denoyer, K.K. and Sciulli, D., 1995, "Dynamics and Control of a Slewing Active Beam," Journal of Guidance, Control and Dynamics, Vol. 18, No. 1, pp. 185~186.

(7) Kwak, M.K. and Sciulli, D., 1996, "Fuzzy-Logic Based Vibration Suppression of a Slewing Active Structure Utilizing Piezoceramic Sensors and Actuators," Journal of Sound and Vibration, Vol. 191 No. 1, pp. 15~28.

(8) 김종선, 1992, "압전소자를 액츄에이터로 이용한 탄성 보의 능동 제어," 한국소음진동학회지, 제 2 권 제 3 호 , pp. 173~180.

(9) 남창호, 황재혁, 오승민, 1993, "압전재료가 있는 복합재 평판의 진동 제어를 위한 구조/제어 최적 설계," 한국항공우주학회지, 제 21권 제 4호, pp. 49~59.

(10) 윤광준, 이영재, 김현수, 1994, "압전세라믹 작동기와 폴리머 센서를 이용한 유리/에폭시 복합

재료 외팔보의 능동 억제," 한국복합재료과학회지, 제 7권 제1호, pp. 48~56.

(11) 황우석, 박현철, 1993, "유연보 진동 제어를 위한 압전감지기/작동기 설계," 한국항공우주학회지, 제 21권 제2호, pp. 26~36.

(12) 고병식, 1995, "압전형 센서/액추에이터를 이용한 진동구조물의 능동-수동제어," 한국소음진동학회지, 제 5권 제3호, pp. 313~325.

(13) 이창배, 한재홍, 이인, 1996, "압전감지기/작동기를 이용한 복합재 보의 최적진동제어 실험," 한국항공우주학회지, 제 24권 제5호, pp. 97~107.

(14) Hwang, W.-S., Park, H. C., and Hwang, W., 1993, "Vibration Control of a Laminated Plate with Piezoelectric Sensor /Actuator: Finite Element Formulation and Modal Analysis," Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 4, pp. 317~329.

(15) Hwang, W.-S., Hwang, W., and Park, H. C., 1994, "Vibration Control of Laminated Composite Plate with Piezoelectric Sensor/Actuator: Active and Passive Control Method," Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 8, No. 5, pp. 571~583.

(16) 송철기, 1996, "자동차의 평판진동 저감을 위한 능동제어," 대한기계학회지, 제 36권 제7호, pp. 705~712.

(17) 곽 문규, 1995, "압전재료를 이용한 지능구조물의 능동진동제어," 한국소음진동학회지, 제 5권 3호, pp. 292~302.

(18) Fanson, J.L. and Caughey, T.K., 1987, "Positive Position Feedback Control for Large Space Structures," Proceedings of 28th Structural Dynamics Conference, Monterey, CA, pp. 588~598.

(19) Poh, S. and Baz, A., 1990, "Active Control of a Flexible Structure Using a Modal Positive Position Feedback Controller," Journal of Intelligent Systems and Structures, Vol. 1.

(20) Denoyer, K.K. and Kwak, M.K., "Dynamic Modelling and Vibration Suppression of a Slewing Active Structure Utilizing Piezoelectric Sensors and Actuators," Journal of Sound and Vibration, Vol. 189, No. 1, pp. 13~31.

(21) Bronowicki, A.J., Betros, R.S., and Hagwood, N.W., "Active Damping Using Piezoceramics", Short Course Notes, SPIE's 1993 North American Conference on Smart Structures, Feb. 1993, Albuquerque, NM, U. S. A.

(22) Balas, M.J., "Feedback Control of Flexible Systems", IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. Ac-23, No. 4, 1978, pp. 673~679.