

PPF와 SRF 제어기법을 사용한 지능구조물의 능동진동제어

라완규**, ⁰곽문규*, 윤광준**

Vibration Suppression of Smart Structures Using PPF and SRF Control Techniques

Wan-Kyu Ra, Moon K. Kwak, Kwang-Joon Yoon

Abstract

This paper is concerned with the active vibration control of grid structure by means of piezoceramic actuators and sensors. The control technique used in this paper is based on the positive position feedback(PPF) and the strain rate feedback(SRF) control, which have been successfully used for the vibration control of beam structures. A new control methodology is developed using the PPF and SRF controller of single-input single-output method. The PPF controller is used for the suppression of first bending mode and SRF controller is used for the suppression of higher vibration modes of grid structure. Electric circuits for the realization of control schemes are explained in detail. The control techniques prove its effectiveness by experiments.

제 1 장 서론

구조물의 진동은 구조물의 동력원에서 발생하는 불균형력이나 외부에서 작용하는 힘에 의해 발생한다. 특히 외부가진력의 진동수가 구조물의 고유진동수와 같아지는 경우 즉, 공진 상태가 발생할 경우에는 적은 힘으로도 구조물이 손상될 수 있다. 공진상태의 진폭은 감쇠(Damping)의 크기에 의해 결정되는데 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 진동제어를 얻을 수 있다. 이와 같이 자연적인 감쇠를 이용하는 방법을 수동진동제어방법이라고 부르는데, 이러한 수동진동제어 방법이 효과적이지 못할 경우 능동진동제어 방법을 모색하게 된다.

* 정희원, 동국대학교 기계공학과

** 건국대학교 항공우주공학과

최근에 개발된 능동진동제어는 구조물에 감지기(sensor)와 작동기(actuator)를 표면에 부착하거나 구조물의 한 부분으로 삽입하여 진동을 능동적으로 제어하는 개념을 말한다. 이와 같이 감지기과 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 입증하였다. 본 논문에서 고려한 구조물은 압전세라믹 감지기와 작동기가 부착된 복합 재료 그리드 구조물로서 우주구조물의 태양판 구조물과 유사하다. 본 논문에서 사용한 제어기법은 Positive Position Feedback (PPF) 제어방법과

Strain Rate Feedback (SRF) 제어기법인데 이 두 방법을 조합하여 두 제어기의 장점을 모두 취할 수 있는 방법을 개발하였다. 본 논문의 제어기를 적용한 구조물은 이차원 구조물로서 그 동안의 주 연구대상이었던 간단한 보구조물과 비교하여 제어기의 설계가 한 단계 어려워졌음을 쉽게 인식할 수 있다.

압전재료가 구조물과 결합된 시스템에 대한 해석은 간단한 보의 해석으로부터 출발하는데 Crawley 등 [1,2] 은 압전작동기를 부착한 구조물의 모델화에 대한 초기 논문들이다. Hanagud 등 [3] 은 외팔보에 압전 작동기와 감지기를 부착한 시스템을 고려하고 유한요소법을 사용하여 모델화하고 Rate Feedback, Modal Feedback, Optimal Output Feedback 제어 기법을 사용하였다. 이외에도 여러 가지 경우에 대한 모델화기법과 제어기법이 여러 논문[4-11]에서 토의되었는데 압전작동기와 감지기를 사용한 진동제어에 관한 논문들에 대해서는 꼭[12]의 논문에서 자세히 다루고 있다. 제어기법중 실제 구조물에 성공적으로 사용된 제어기법은 Fanson 과 Caughey [13]가 개발한 일반화된 변위 신호를 Positive Feedback 하는 기법인 PPF 제어 기법이다. Fanson 과 Caughey [13] 는 압전재료를 붙인 외팔보를 사용하여 실험적으로 PPF 제어 기법의 타당성을 증명하였고 Poh 와 Baz [14] 는 PPF 제어이론을 확장하여 Independent Modal Space Control (IMSC) 개념에 입각한 Modal Positive Position Feedback 제어 기법의 사용을 제안하였다. Denoyer 와 Kwak [15] 는 PPF 제어이론을 사용하여 여러 모드를 동시에 제어하는 방법을 제시하였다. SRF 제어이론은 Bronowicki 등 [16] 의 Short Course Note 에 자세히 설명되어 있는데 이 방법은 여러 모드를 제어하는데 효과적이다.

제 2 장 PPF 제어 기법

앞에서 설명하였듯이 많은 종류의 제어 기법들이 지능 구조물에 성공적으로 적용되었지만 실제 적용면에서 가장 성공적인 PPF 제어(Positive Position Feedback Control) [13,15]기법을 고려해 보자.

PPF 제어는 일반 변위를 계측하여 진동을 억제하는 방법인데 다음과 같은 장점들을 지니고 있다. 먼저 감쇠를 증가시키고자 하는 주파수 영역을

확실하게 제어할 수 있다. 즉, 특정한 고유 진동 모드를 선택하여 제어할 수 있다. 실제로는 구조물의 기본 진동모드를 제어하면 가장 효과적이기 때문에 구조물의 기본진동수에 보상회로의 코너주파수를 맞추게 된다. PPF 제어기는 OP Amp를 이용하여 쉽게 구현이 가능하며 spillover 에 덜 민감하고 작동기의 동적 거동에 의해 불안정해지지 않는다.

PPF 제어 기법의 원리를 설명하기 위하여 모드 하나에 대한 1자유도 2차 미분방정식을 예로 들어보자. 이 경우에 대하여 운동 방정식은 다음 식으로 나타내어지는데

$$\ddot{\eta} + 2\zeta\omega \dot{\eta} + \omega^2\eta = g\omega^2\xi \quad (1)$$

여기서 η 는 구조물의 모달좌표계를 나타내고 ζ 와 ω 는 구조물의 점성감쇠계수와 고유진동수를 나타낸다. g 는 게인을 나타내며 ξ 는 PPF 필터의 출력을 나타낸다. PPF 제어 보상회로식은 구조물의 운동방정식과 비슷한 형태로 다음과 같이 주어진다.

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

여기서 ζ_f 와 ω_f 는 PPF 필터의 점성감쇠계수와 고유진동수를 나타낸다. 이 보상 회로의 전달함수는 다음과 같이 되는데

$$H(s) = \frac{\omega_f^2}{s^2 + 2\zeta_f\omega_f s + \omega_f^2} \quad (3)$$

이식은 결국 저주파 통과 필터(Low-Pass Filter)와 같은 형태로 됨을 알 수 있다. 이 회로는 개루프 Pole를 허수 축에서 멀리 이동시키는 역할을 한다. 그러나 게인이 너무 커지면 불안정계가 될 수 있어 게인을 결정하는데 있어 주의하여야 한다. PPF 제어기의 적용은 $\omega_f = \omega$ 로 만들어 가장 심각한 진동을 유발하는 고유 진동 모드를 제어하게 된다. 실제 구조물에서는 물론 무한개의 Pole과 Zero들이 있어서 PPF 제어기를 적용하기 위해서는 고유 모드들이 서로 확실하게 구별되어야 한다. 이런 경우에 구조물의 특정 고유 모드를 다른 모드들에는 영향을 주지 않으면서 제어할 수 있다.

여러 개의 모드를 제어하고자 한다면 개개의 모드를 제어할 수 있는 PPF 제어를 설치하여 비중앙화 제어 (Decentralized Control) 개념 하에 몇 개의 모드를 제어할 수도 있고 아니면 Pseudo-Inverse 에 근거 실제 적용되는 힘을 산출할 수도 있다.

앞에서 지적한 바와 같이 PPF 제어기는 그 형태가 저주파통과필터와 동일하다. 그래서 Fig 1과 같이 OP Amp를 사용하여 회로를 구성하면 PPF 제어를 쉽게 구현할 수 있다. 이와 같은 저주파통과필터의 출력전압과 입력전압의 비는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{\frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}}{s^2 + \frac{C_2(R_1 + R_2)}{R_1 R_2 C_1 C_2} s + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (4)$$

$$= \frac{\omega_f^2}{s^2 + 2\zeta_f \omega_f s + \omega_f^2}$$

여기서 ω_f 와 ζ_f 는 각각 저주파통과필터의 코너주파수와 감쇠비를 나타내는데 각각 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\omega_f = \sqrt{\frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (5)$$

$$\zeta_f = \sqrt{\frac{C_2 (R_1 + R_2)^2}{4R_1 R_2 C_1}}$$

특기할 사항은 저주파통과필터가 코너주파수에서 위상이 90도로 바뀐다는 것이다. 구조물의 감쇠에 의한 영향이 변위와의 90도 위상차로 나타나는 것을 고려한다면 코너주파수를 제어하고자하는 구조물의 고유진동수에 일치시킬 경우에 감쇠가 인위적으로 증가된 효과를 얻을 수 있다. 코너주파수를 지나면 게인이 급격히 감소하여 고차모드로의 Spillover 가 감소된다. 그러나 코너주파수보다 작은 주파수내에서는 불안정이 발생할 수 있다.

그리드구조물에 대하여 FFT 신호분석기 (HP 35670A)를 이용하여 진동실험을 수행한 결과 최저차 진동모드는 굽힘진동모드이며 고유진동수는 9.5Hz 가 됨을 확인할 수 있었다. 따라서 1차의 굽힘모드에 대한 PPF 제어기의 구현을 위하여 $R_1=5M\Omega$, $R_2=1M\Omega$ 의 가변저항, $C_1=2nF$, $C_2=68nF$ 의 값을 사용하였다. 가변저항을 사용한 이유는 저

항과 축전지의 실제 값이 약간 차이가 나기 때문에 가변저항을 이용하여 코너주파수를 정확히 9.5 Hz에 맞추어야 했기 때문이다. Fig 2는 1차의 굽힘모드제어를 위한 PPF 제어기의 주파수응답을 보여주고 있다.

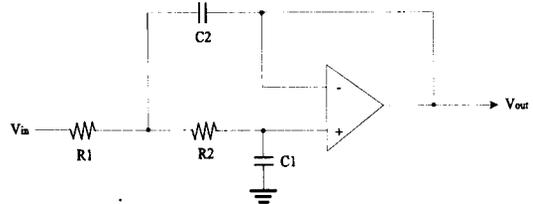


Fig 1 PPF Controller Circuit

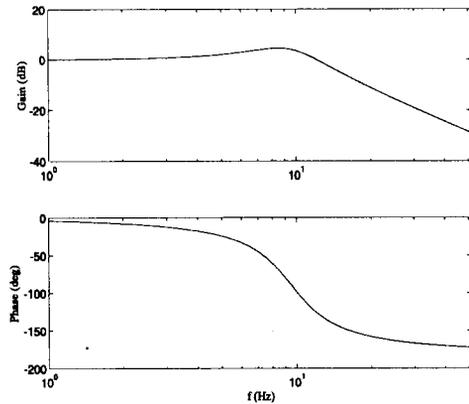


Fig 2 Frequency Responses of PPF Controller for 1st Bending Mode

제 3 장 SRF 제어기법

SRF 제어는 일반변위를 시간에 대해 한번 미분한 일반 속도를 제어기로 입력하여 진동을 억제하는 방법인데 다음과 같은 장점을 가지고 있다. 먼저 PPF 제어기법이 선별된 하나의 모드를 제어하는데 비하여 SRF 제어기법은 넓은 주파수 영역에 걸친 여러 개의 진동모드를 동시에 제어할 수 있다. SRF 제어기도 OP Amp를 이용하여 쉽게 구현할 수 있다. 단점은 제어주파수 밖에서는 음의 감쇠 효과를 주기 때문에 불안정해질 수 있다는 것이다. SRF 제어기법을 설명하기 위하여 식 (1)에

서 고려한 운동방정식을 고려하여 보자.

$$\ddot{\eta} + 2\zeta\omega_f\dot{\eta} + \omega_f^2\eta = g\omega_f^2\xi \quad (6)$$

여기서 ξ 는 식 (1)과는 달리 SRF필터의 출력을 나타낸다. SRF 제어보상회로식은 구조물의 운동방정식과 비슷한 형태로 다음과 같이 주어진다.

$$\ddot{\xi} + 2\zeta_f\omega_f\dot{\xi} + \omega_f^2\xi = \omega_f^2\dot{\eta} \quad (7)$$

여기서 ζ_f 와 ω_f 는 SRF필터의 감쇠계수와 고유진동수를 나타낸다. 식 (2) 와 비교하여 보면 이식의 오른편 항이 일반속도로 표현되어 있는 것을 발견할 수 있다. 이와 같은 보상회로의 전달함수는 다음과 같이 되는데,

$$H(s) = \frac{s\omega_f^2}{s^2 + 2\zeta_f\omega_f s + \omega_f^2} \quad (8)$$

이식은 밴드 통과 필터(Band-Pass Filter)와 같은 형태로 됨을 쉽게 알 수 있다. 이와 같은 전달함수를 갖는 SRF는 OP Amp를 사용하여 간단하게 회로로 구성할 수 있다.

SRF 회로의 게인을 너무 크게 하면 불안정계가 될 수 있어 게인을 결정하는데 주의해야 한다. SRF 제어기는 구조물의 Zero에 코너주파수를 맞추고 코너주파수 이하의 고유진동모드를 제어하는 것이 일반적이다. 그러나 본 논문에서는 제일 문제가 되는 기본 진동모드를 PPF 제어기로 제어하고 2차 진동모드부터는 SRF 제어기로 제어하는 방법을 취하였다. 따라서 본 논문에서 제안한 제어방법을 사용하면 이론상 모든 모드를 제어할 수 있다.

SRF제어기는 그 형태가 밴드 통과 필터와 동일하기 때문에 Fig 3과 같은 회로를 사용하여 구현할 수 있다. 이와 같은 밴드통과 필터의 출력전압과 입력전압의 비로 밴드 통과 필터의 코너주파수와 감쇠비를 구할 수 있는데 각각은 다음과 같은 식으로 표현한다.

$$\omega_f = \frac{1}{\sqrt{R_3 C_1 C_2}} \sqrt{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}$$

$$\zeta_f = \frac{1}{2} \frac{\sqrt{\frac{C_2}{C_1}} + \sqrt{\frac{C_1}{C_2}}}{\sqrt{R_3 \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)}} \quad (9)$$

Fig 4는 SRF 제어기의 주파수 응답을 보여준다. 그리드 구조물에 대하여 2차 이상의 진동모드를 제어하기 위해 두 번째 Zero에 해당하는 16Hz에 SRF의 코너주파수를 일치시켰는데 사용된 저항과 축전지 용량값들은 다음과 같다.

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

여기서, 저항과 축전지 값들은 고정된 것이 아니고 제어 효과가 큰 값들을 선택하여 사용하여야 한다.

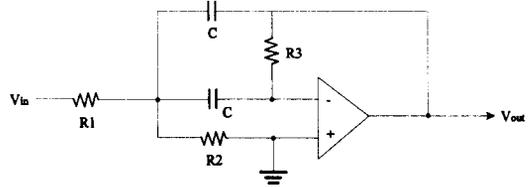


Fig 3 SRF Controller Circuit

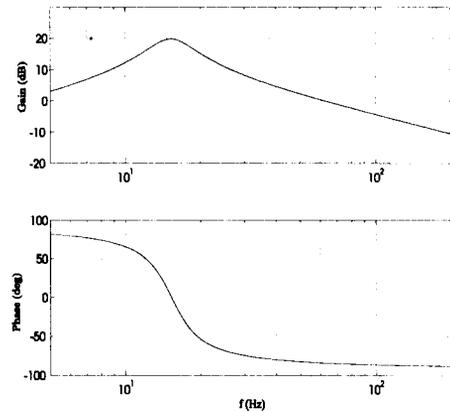


Fig 4 Frequency Response of SRF Controller

제 4 장 실험장치 및 결과

본 논문에서 사용한 복합재료 그리드 구조물의 형상은 Fig 5와 같다. 한국카본(주)의 CF-3327 프리프레그 10장을 적층하여 제작한 평판을 다이아몬드 절단기로 절단하였고 압전세라믹의 접착은 90분 경화용 에폭시를 이용하여 구조물의 표면에 접착시켰는데 탄소섬유 복합재료 구조물이 전기적으로 도체이기 때문에 압전세라믹의 접착부분이 구조물과 전기적 성질을 공유하게 된다. 작동기는 접지로서 구조물과 공유되어 사용 가능하지만, 감지

기는 구조물과 접지를 공유하게 되면 작동기의 접지와도 연결이 되어 폐회로제어시스템을 구성하였을 때 감지기에서 구조물의 변형을 계측하지 못해 감지기로서의 역할을 할 수 없기 때문에 구조물과 전극을 분리해야 한다. 이런 이유로 얇은 구리판(Copper Foil)에 절연성이 우수한 유리섬유 프리프레그 1장을 적층하여 오토클레이브에서 성형하여, 한 면은 전기적으로 도체이고 반대면은 부도체로 이 면을 구조물에 먼저 접촉시키고 뒷면에 압전세라믹을 접착하여 감지기를 구조물과 작동기로부터 격리하는데, 이때 접착면의 전극을 위해 통전예폭시를 사용하였다.

두 개의 압전세라믹 평판을 하나의 작동기로, 상대적으로 작은 하나의 압전세라믹을 감지기로 사용한다. 두 개의 작동기가 한 개의 작동기로 동작하도록 연결되었는데 각각 구조물의 양면에 접착되었다. 이 경우 전압이 가해졌을 때 한쪽 면은 인장을 하고, 반대쪽은 압축을 하게 되어 전체적으로 굽힘이 유발되도록 한다.

작동기는 큰 제어력을 발휘할 수 있도록 큰 것을 그리고 감지기는 구조물의 변형을 계측하는 것으로서 크기가 증가되면 구조물의 강성에 영향을 주기 때문에 작동기에 비해 작은 것을 택하였다. 이와 같은 구성은 2개의 작동기와 2개의 감지기를 가지고 있는 능동구조물을 나타내는데 Fig 5에 보이는 바와 같이 구조물의 고정된 밑단에 작동기를, 그리고 작동기 가까이 감지기를 붙인 형태를 취하였다. Fig 5에 구조물의 자세한 모양과 치수가 표시되어 있다.

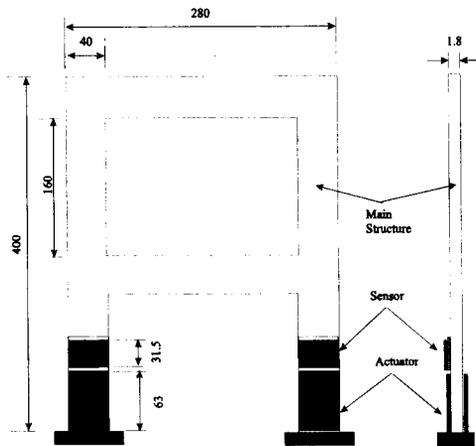


Fig 5 Schematic of Grid Structure

이와 같은 그리드 구조물은 연속적인 구조물로서 무한개의 고유진동수와 고유모드를 가지고있어 유한개의 작동기와 감지기로 이들을 모두 제어하는 것은 불가능하며 이로 인해 spillover 현상이 유발된다. 그러나 자연계에 존재하는 대부분의 구조물들은 고차 진동모드에서 구조물에 내재된 감쇠의 영향으로 인해 제어를 필요로 하지 않기 때문에 저차의 진동모드만을 고려한 제어시스템이 설계될 수 있다.

본 논문에서는 Fig 6과 같이 제어기를 설계하였는데 각각의 감지기와 작동기는 단독적으로 제어를 하는 Single Input Single Output (SISO)형태로 이루어진 Decentralized 제어기의 형태를 지니고 있다. 최저차의 굽힘모드는 PPF 제어기로 제어하고 2차의 비틀림모드부터 고차의 진동모드는 SRF 제어기를 사용하여 제어하였는데 SRF 제어기가 2차 모드 이상의 고주파수 대역을 담당하므로 1차의 진동모드를 불안정하게하는 것과 같은 영향을 준다. 그래서 개개의 모드를 독립적으로 제어하는 PPF 제어기를 이용하여 1차의 진동모드를 제어하고 SRF 제어기의 코너 주파수는 두 번째 Zero 인 16Hz에 맞추어 고차모드를 제어하도록 설계하였다.

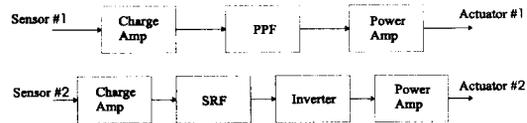


Fig 6 Block Diagram of Mixed Control

Fig 7은 이와 같은 제어기를 적용한 실험결과로서 1차와 2차 모드 뿐만이 아니라 그 이상의 고차모드까지 제어가 됨을 알 수 있다.

제 5 장 토의 및 결론

능동 진동 제어에 사용되고 있는 감지기/작동기들 중 압전세라믹은 몇 가지 장점을 지니고 있어 그 적용에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있는 현실이며 실제 구조물로의 적용이 이루어지고 있다. 특히 진동이 시스템의 성능에 심각한 영향을 미치는 우주구조물의 경우 수동적인 진동제어방법으로 원하는 성능을 성취하기 곤란하기 때문에 능동진동 제어방법이 추구하고 있다.

제 6 장 참고문헌

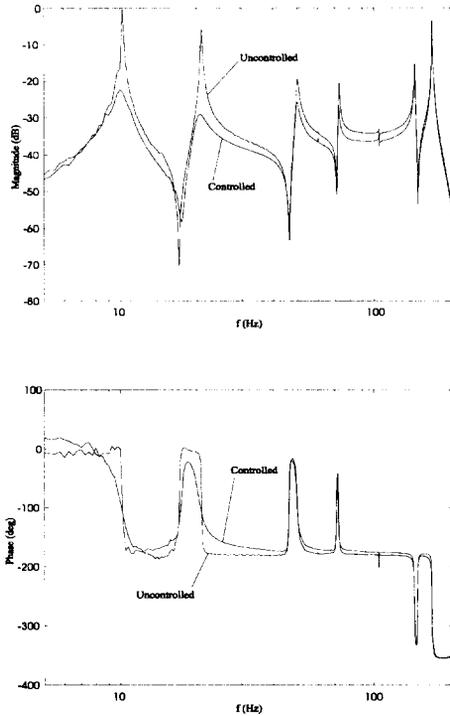


Fig 7 Frequency Responses of Mixed Control

본 논문에서는 실제 문제에 있어서 그 성능이 입증되었고 우주구조물로의 적용이 논의되고 있는 압전세라믹을 이용한 진동제어방법들 중 PPF와 SRF 제어기법의 특성을 자세히 설명하고 이들을 결합한 새로운 형태의 제어기를 설계하였다. PPF와 SRF 제어기가 간단한 전자회로로 구현될 수 있기 때문에 새로이 개발된 제어기도 쉽게 구현할 수 있다. PPF와 SRF를 결합한 제어기법을 2차원 그리드 구조물에 적용하여 타당성을 조사하였는데 실험 결과 그리드 구조물의 저차의 여러 모드를 제어할 수 있음을 확인할 수 있었다.

본 논문의 연구결과로부터 알 수 있듯이 PPF와 SRF 제어기법은 압전작동기와 감지기가 부착된 구조물의 진동제어에 매우 효과적이다. 특히 우주구조물과 같은 그리드구조물을 대상으로 하여 진동제어가 성공적으로 수행될 수 있음을 입증하였는데 미래우주구조물의 진동제어문제 해결에 큰 도움이 될 것으로 예상된다.

[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] 김 종선, 1992, "압전소자를 액츄에이터로 이용한 탄성 보의 능동 제어," *한국소음진동학회지*, 제 2권 3호, pp. 173-180.

[9] 남 창호, 황 재혁, 오 승민, 1993, "압전재료가 있는 복합재 평판의 진동 제어를 위한 구조/제어 최적 설계," *한국항공우주학회지*, 제 21권 4호, pp. 49-59.

[10] 윤 광준, 이 영재, 김 현수, 1994, "압전세라믹 작동기와 폴리머 센서를 이용한 유리/에폭시 복합 재료 외팔보의 능동 억제," *한국복합재료과학회지*, 제 7권 1호, pp. 48-56.

[11] 황 우석, 박 현철, 1993, "유연보 진동 제어를

위한 압전감지기/작동기 설계," *한국항공우주학회지*, 제 21권 2호, pp. 26-36.

[12] 박 문규, 1995, "압전재료를 이용한 지능구조물의 능동진동제어," *한국소음진동학회지*, 제 5권 3호, pp. 292-302.

[13] 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.

[14] 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.

[15] 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.

[16] 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.