

〈논 문〉

지능구조물의 능동진동제어를 위한 다중 PPF 제어기와 수정 LQG 제어기의 비교 연구

Comparison of the Multiple PPF Control and the Modified LQG Control for the Active Vibration Suppression of Intelligent Structures

곽 문 규*

Moon K. Kwak

(1998년 8월 19일 접수 ; 1998년 10월 15일 심사완료)

Key Words : Active Vibration Control(능동진동제어), Grid Structure(격자 구조물), Piezoceramic(압전세라믹), PPF(양위치제환), LQG

ABSTRACT

This research is concerned with the multiple PPF and the modified LQG controller design for active vibration control of intelligent structures. The intelligent structure is defined as the structure equipped with smart actuators and sensors. Various control techniques aimed for the piezoceramic sensors and actuators have been proposed for the active vibration control of smart structures and some of them prove their effectiveness experimentally. In this paper, the multiple PPF controller and the modified LQG controller are developed and applied to the smart grid structure. The multiple PPF control and the modified LQG control can be classified as the classical and the modern control techniques, respectively. The experimental results show that both control techniques are effective in suppressing vibrations. Two control techniques are compared with respect to the design process, the ease of implementation and the effectiveness

1. 서 론

지능 구조물은 분포된 감지기와 작동기, 그리고 이들을 이용하여 진동제어를 성취하도록 조종하는 마이크로 프로세서를 자체적으로 보유하고 있는 구조물을 가리킨다. 개념적으로 지능구조물은 충격이나 내부 구조물의 변화에 능동적으로 대처할 수 있는 기능을 가진 구조물로 인식되고 있다. 여러 가지 형태의 재료가 작동기와 감지기로서 시험되었는데 압

전 재료, 형상기억 합금, electrostrictive materials, magnetostrictive materials, electro-rheological fluids, fiber optics 등이 대표적이다. 이들 재료들은 구조물의 표면에 부착되거나 부재 형태로 삽입되어 감지기 또는 작동기의 역할을 수행한다. 이들 재료 중 압전 재료가 고강도, 온도특성, 부착의 용이 등으로 인하여 최근에 가장 많이 사용되고 있다. 압전재료는 두께에 걸쳐 전압이 작용하는 경우 변형이 일어나게 되는데 반대로 압전재료에 변형이 일어나는 경우 전하가 발생하게 된다. 따라서 압전재료는 작동기나 감지기로 모두 사용이 가능한 재료이다. 가장 보편적으로 사용되는 압전 재료는 lead zirconate

* 정희원, 동국대학교 공과대학 기계공학과

titanite 로 이루어진 압전 세라믹 판이다. 압전 세라믹 판은 얇은 판 형태로 제공되고 있어 접착제를 이용하여 구조물에 쉽게 부착된다. 압전재료를 이용한 작동기는 구조물의 일부에 변형을 일으키는 변형을 작동기로 인식된다.

압전 재료를 포함한 구조물의 해석은 보 구조물의 해석으로부터 출발한다. Crawley 등^(1,2)은 압전세라믹 감지기와 작동기를 포함한 보 구조물의 모델링 방법에 대하여 논의하였고 Hanagud 등⁽³⁾은 유한요소법을 사용한 지능 구조물의 모델링에 대하여 소개하고 변형을 되먹임 모달 제어와 최적 출력 제어를 설계하여 진동제어를 수행하였다. Fanson과 Caughey⁽⁴⁾는 모달 변위 신호를 이용한 Positive Position Feedback (PPF) 제어기의 사용을 제시하였다. Poh와 Baz⁽⁵⁾는 다자유도계에 대하여 독립 모달 공간 제어 개념에 입각한 PPF 제어기의 사용을 제시하였다. 그 외 보 구조물과 판 구조물의 진동제어에 관한 많은 논문이 발표되었다^(6~13). PPF 제어기는 특정한 모드를 제어하고자 할 경우 가장 효과적인데 특정 모드의 감쇠를 극대화할 수 있고 제어하지 않는 다른 모드를 불안정하게 만들지 않는다. 한 개의 입력과 한 개의 출력(single-input single-output)으로 이루어지는 PPF 제어기는 저주파 통과 필터의 형태로 되어 있어 일반 OP Amp로 쉽게 구현이 된다. 따라서 매우 실용적이다. 그러나 다중 입력과 다중 출력 (multi-input multi-output) PPF제어계의 구현은 아날로그 회로로 구현이 다소 어렵다. 따라서 본 논문에서는 디지털화한 다중 PPF 제어기를 복합재 격자 구조물에 적용하여 타당성을 조사하였다.

PPF 제어기는 고전적인 제어방법을 토대로 설계되었는데 이와는 달리 상태방정식을 바탕으로 제어기를 설계할 수 있다. 상태방정식에 근거한 제어방법으로는 최적제어기(optimal controller)가 대표적이다. 일반적으로 최적제어의 해는 행렬 대수 Riccati 방정식으로부터 얻어진다⁽¹⁴⁾. 상태변수가 모두 관측되지 못하는 경우 Kalman Filter와 같은 Observer에 의존하게 된다. 일반적으로 최적제어기와 Observer를 결합한 형태를 LQG 제어라고 부른다. LQG 제어의 단점은 이득행렬 계산을 위하여 몇 가지 계수 행렬을 미리 결정해야 한다는 것이다. 이런 단점을 개선하기 위해서 미리 정한 안정도를 가지는 최적제어기 Anderson과 Moore^(15,16)에 의하여 개발되었고 구조물의 진동문제로의 적용을 Kwak⁽¹⁷⁾이 다루었다. 본 논문에서는 일반변위에 부

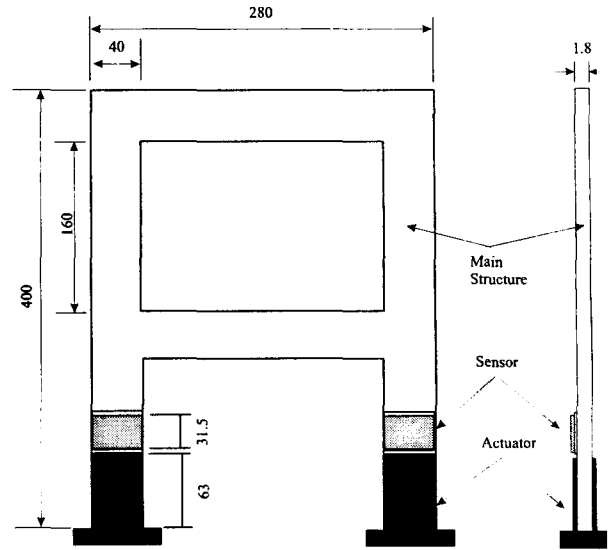


Fig. 1 Schematic of grid structure

과되었던 수렴도⁽¹⁷⁾을 모달공간상의 모달변위에 부과하는 방법으로 확장하여 개발하였다.

이 논문은 압전 세라믹 감지기와 작동기를 포함하고 있는 지능 격자 구조물⁽¹¹⁾을 대상으로 위에서 언급한 능동 진동 제어기법인 다중 PPF 제어기와 수정 LQG 제어기의 적용문제를 다루었다. 실험 대상인 Fig. 1의 지능 격자 구조물은 인공 위성에 장착된 태양 판의 복제품이다. 태양 판의 진동은 인공위성의 자세 및 방향성에 영향을 미치고 여러 가지 전자 장비에도 영향을 미치므로 반드시 제어되어야 한다. 지능 격자 구조물은 이와 같은 목적을 달성하기 위하여 제작되었으며 여러 가지 진동 제어 기법을 시험해 볼 수 있는 실험장치이다. 지능 격자 구조물은 한 쌍의 압전 세라믹 판으로 이루어진 작동기와 작은 압전 세라믹 판 감지기가 부착되어 있는데 전체적으로는 두 개의 감지기와 두 개의 작동기로 이루어진 시스템이라고 말할 수 있다. 또한 압전감지기와 작동기가 서로 근접해 있어 Nearly Collocated System을 구성한다.

이와 같은 실험 시스템은 두 개의 입력과 두 개의 출력을 갖는 제어계를 필요로 하게 되는데 전형적인 Multi-Input Multi-Output (MIMO) 시스템이라고 말할 수 있다. 진동 제어에 관한 대부분의 연구가 간단한 보 구조물을 대상으로 수행되었으며 제어계 역시 Single-Input Single-Output (SISO) 시스템을 근거로 하여 능동진동제어에 관한 이론을 효과적으로 검증하기가 곤란하였다. 본 논문에서 고려한 지능격자 구조물은 진동 특성이 복잡하고 여러 개의

감지기와 작동기를 포함하고 있어 진동제어를 위하여 개발된 제어이론들을 시험하기에 적당하다. 압전 세라믹을 포함한 지능 격자 구조물에 대한 모델링은 라완규, 광문규, 윤광준의 논문⁽¹¹⁾에서 자세히 다루고 있어 본 논문에서는 그 결과만을 인용한다. 라완규, 광문규, 윤광준의 논문⁽¹¹⁾에서 이론적인 모델링 결과를 실험 결과와 비교하였는데 저차의 모드에 대해서는 그 차이가 근소한 것으로 입증되었다.

본 논문에서는 다중 PPF 제어기와 수정 LQG 제어기를 개발하여 두 개의 감지기와 두 개의 작동기로 네 개의 모드를 제어하는 방법을 제시하고 이를 실험적으로 입증하였다. 제어기의 설계를 위해서 라완규등⁽¹¹⁾의 논문에서 유도된 유한요소모델을 모달 공간상의 모델로 변환하였다. 다중 PPF 제어기는 pseudo inverse 기법과 모달 공간 제어기 설계의 개념을 결합하여 설계되었는데 최종적으로는 디지털화되어 DSP chip을 사용하여 구현되었다. 또한 모달 변위가 미리 정한 수렴도를 갖도록 수정하여 개발된 새로운 형태의 LQG 제어기도 디지털화되어 DSP chip을 사용하여 구현되었다. 두 제어기 모두 네 개의 모드를 성공적으로 제어함을 실험 결과가 보여주고 있다. 본 논문에서는 이들 두 제어기를 설계 실제 적용, 실험 결과를 바탕으로 좀더 자세히 비교하였다.

2. 지능 격자 구조물의 모델링

Fig. 1의 지능 격자 구조물은 carbon/epoxy fabric prepreg (Hankook Carbon Co. CF-3327)와 glass/epoxy fabric prepreg (Hankook Fiber Co. C(35)을 이용하여 제작되었다. 가는 동판을 압전 세라믹 판에 연결하고 90-분 경화용 epoxy를 이용하여 부착하였다. Silver epoxy (Daejoo Precision Co. DS-7276-A)가 압전세라믹의 electrode와 동선을 연결하기 위하여 사용되었다. Fig. 1의 단위는 mm이다.

지능격자 구조물은 본질적으로 3차원 구조물이지만 저차의 모드만이 제어 대상인 경우 굽힘과 비틀림을 고려한 격자 유한 요소 모델을 이용하여 이론적인 모델을 도출할 수 있다. 모델링 결과는 참고문헌⁽¹¹⁾에 자세히 나와 있으며 본 논문에서는 그 결과만을 제시한다. 이와 같은 지능 격자 구조물에 대해서 최종적인 운동방정식은 다음과 같이 쓰여진다.

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = B_a v_a, \quad v_s = B_s x \quad (1)$$

여기서 x 는 절점에서의 변위로 이루어진 벡터이며, M, C, K 는 각각 질량, 감쇠, 강성행렬을 나타낸다. B_a, B_s 는 작동기와 감지기의 영향행렬이며 v_a, v_s 는 작동기와 감지기의 전압을 나타낸다.

고유치와 고유모드의 직교성, $U^T M U = I$, $U^T K U = \Lambda$ 을 이용하면 운동 방정식을 다음과 같이 모달 공간상에서 표현할 수 있다.

$$\ddot{q} + 2Z\Omega\dot{q} + \Lambda q = U^T B_a v_a, \quad v_s = B_s U q \quad (2)$$

여기서 U, Λ 는 고유벡터와 고유치 행렬을 나타내며 Z 는 감쇠인자 행렬을 나타낸다. 감쇠행렬의 유도가 사실상 불가능하기 때문에 본 연구에서는 동일한 감쇠인자를 모든 모드에 대하여 부과하였다. 자연감쇠가 제어기 설계 관점에서 보면 안정성을 높이는 방향으로 작용하기 때문에 능동 제어기 설계에는 큰 문제가 되지 않는다.

Fig. 2는 식 (1)에 근거하여 계산된 주파수 응답곡선과 FFT신호분석기를 이용하여 구한 주파수 응답곡선을 비교하여 보여주고 있다. 전달함수는 작동기 1번과 감지기 1번 사이의 값이며 작동기 1번과 감지기 1번은 서로 근접해 있다. 이론적인 전달함수를 구할 때 감쇠인자는 모든 모드들에 대하여 0.1%로 가정하였다.

고유치 문제를 풀어 얻은 고유진동수와 고유모드 중 최저차로부터 4개의 고유진동수와 고유모드가 Fig. 3에 보여지고 있다. Fig. 3으로부터 알 수 있듯이 지능 격자 구조물은 저차 모드에서 굽힘과 비틀림 진동 모드가 번갈아 나타나는 특이한 진동특성을

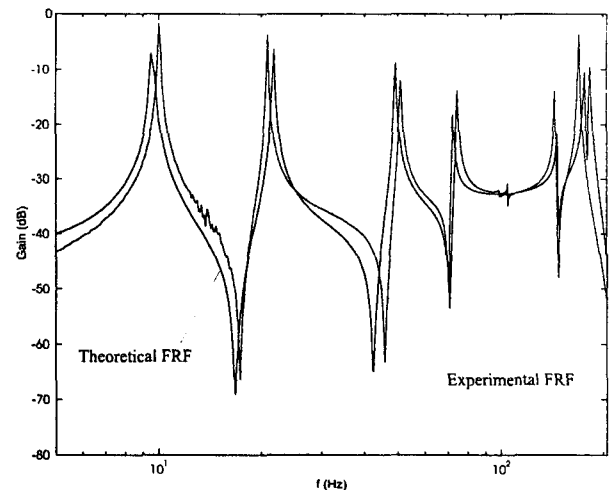


Fig. 2 Theoretical and experimental frequency response functions

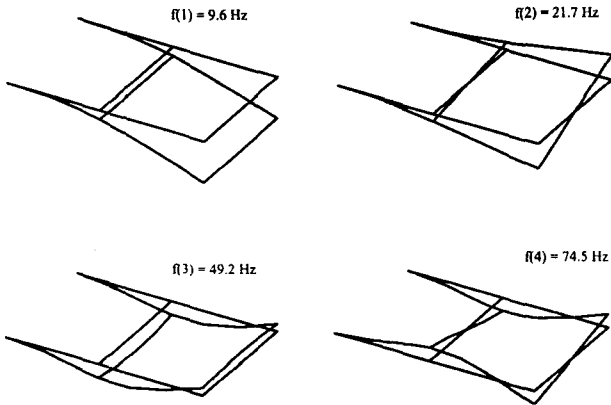


Fig. 3 Natural frequencies and modes of the grid structure

나타내고 있다. 또한 굽힘 진동모드는 중앙선에 대하여 대칭이며 비틀림 진동모드는 중앙선에 대하여 역대칭임을 알 수 있는데 이와 같은 점을 고려할 때 굽힘 진동모드 제어와 비틀림 진동모드 제어는 별도로 이루어 질 수 있다고 말할 수 있다. FFT 신호 분석기를 이용하여 구한 각각의 고유진동수는 9.5, 20, 48, 70 Hz로서 이론적인 결과와 비교적 잘 일치한다.

저차의 네 모드를 고려하면 각각의 행렬은 다음과 같이 표현되는데 이식으로부터 대칭과 역대칭의 모드가 영향계수의 부호에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 본 논문에서는 4개의 모드만을 고려한 진동제어를 고려하여 제어기를 설계하였다. 이 경우 계수 행렬들은 다음과 같다.

$$2Z\Omega = \begin{bmatrix} 0.603 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.365 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3.903 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4.681 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$A = \begin{bmatrix} 3637.1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 18625.8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 95662.8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 219085.6 \end{bmatrix}$$

$$U^T B_a = \begin{bmatrix} -0.0033 & -0.0033 \\ 0.0063 & -0.0063 \\ -0.0175 & -0.0175 \\ -0.0250 & 0.0250 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$B_s U = \begin{bmatrix} -10693 & 15733 & -20881 & -18038 \\ -10693 & -15733 & -20881 & 18038 \end{bmatrix}$$

3. 다중 PPF 제어기의 설계

식 (2)는 다시 다음과 같은 형태로 전환되어 나타낼 수 있다.

$$\ddot{q} + 2Z\Omega\dot{q} + \Lambda q = Q \quad (5)$$

여기서 $Q = [Q_1 \ Q_2 \ Q_3 \ Q_4]^T$ 는 모달 제어력 벡터를 나타내며, 각각의 모달 제어력은 PPF 보상회로에 의하여 계산된다. 라플라스 영역에서의 PPF 제어기는 다음과 같이 표현된다⁽¹³⁾.

$$\bar{Q}_i(s) = H_i(s) \bar{q}_i(s), \quad i=1,2,3,4 \quad (6)$$

여기서 bar는 Laplace 변환을 나타내며 H_i , ($i=1,2,3,4$)는 각각의 모드에 대한 PPF 제어기를 나타낸다. 두 개의 감지기와 작동기가 있기 때문에 4 개의 모달 제어력은 pseudo inverse 기법을 이용하여 계산되어야 한다. 따라서 다음과 같은 계산식을 사용하여 모달 변위와 모달 제어력이 계산된다⁽¹³⁾.

$$\bar{q} = (B_s U)^+ \bar{v}_s, \quad \bar{v}_a = (U^T B_a)^+ \bar{Q} \quad (7)$$

여기서 $+$ 는 pseudo inverse를 나타낸다.

식 (6)과 (7)을 사용하면 최종적인 다중 PPF 제어기는 다음과 같이 유도된다⁽¹³⁾.

$$\bar{v}_a(s) = (U^T B_a)^+ H(s) (B_s U)^+ \bar{v}_s(s) \quad (8)$$

여기서

$$H(s) = \begin{bmatrix} H_1(s) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & H_2(s) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & H_3(s) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & H_4(s) \end{bmatrix} \quad (9)$$

이며 각각의 PPF 제어기는 다음과 같은 형태로 이루어진다.

$$H_i(s) = \frac{\omega_i^2}{s^2 + 2\zeta_i \omega_i s + \omega_i^2}, \quad i=1,2,3,4 \quad (10)$$

여기서 ζ_i , ω_i 는 PPF 제어기의 감쇠율과 고유진동수이다. 이 식은 사실상 저주파수 통과 필터를 나타내는데 능동 감쇠를 줄 수 있는 주파수 대역을 구조물의 고유진동수에 맞추면 90도의 위상차를 이루어 감쇠가 커지는 효과를 얻을 수 있다. 따라서 PPF 제어기를 적용하기 위해서는 구조물의 고유진동수를 이론이나 실험을 통해서 먼저 구해야만 한다.

위에서 유도한 다중 PPF 제어기의 구현을 위해서는 각각의 모드에 대한 PPF 제어 회로 외에 행렬 연산 회로가 필요하다. 아날로그 회로 구현이 복잡하기 때문에 본 연구에서는 DSP Chip을 이용하

여 디지털 제어를 구현하였는데 이를 위하여 다음과 같은 bilinear 변환을 사용하였다.

$$s = \frac{2}{T} \frac{z-1}{z+1} \quad (11)$$

여기서 T 는 샘플링시간을 나타내는데 불안정을 일으키지 않도록 충분히 빨라야 한다.

$$H(z) = \frac{b_2 z^2 + b_1 z + b_0}{z^2 + a_1 z + a_0} \quad (12)$$

여기서

$$\begin{aligned} b_2 &= \omega_f^2 / \Delta, & b_1 &= 2\omega_f^2 / \Delta, & b_0 &= \omega_f^2 / \Delta, \\ a_1 &= \left(2\omega_f^2 - \frac{8}{T^2} \right) / \Delta \\ a_0 &= \left(\frac{4}{T^2} - \frac{4\zeta_f \omega_f}{T} + \omega_f^2 \right) / \Delta, \\ \Delta &= \frac{4}{T^2} + \frac{4\zeta_f \omega_f}{T} + \omega_f^2 \end{aligned} \quad (13)$$

참고문헌 (13)에서 구한 다중 PPF 제어기, 식 (8) 은 실험적으로 증명되었지만 실제로 고려되지 않은 문제가 있다. 바로 PPF제어기의 적용으로 인한 주파수 이동현상이다. 다중 PPF 제어기를 적용하는 경우 저차의 고유진동수는 고차의 고유진동수가 제어되는 경우 낮아지게 된다. 따라서 터닝(tuning) 과정에서 4번째의 고유진동 모드에 대하여 PPF 제어기를 설계하고 그 다음 3번째, 2번째, 첫 번째로 옮겨가면 PPF 제어기를 설계하여야 하는 번거로움이 있다. Fig. 4는 3번째와 4번째의 고유모드를 제어하는 경우 나타나게 되는 페루프 시스템의 고유진동수

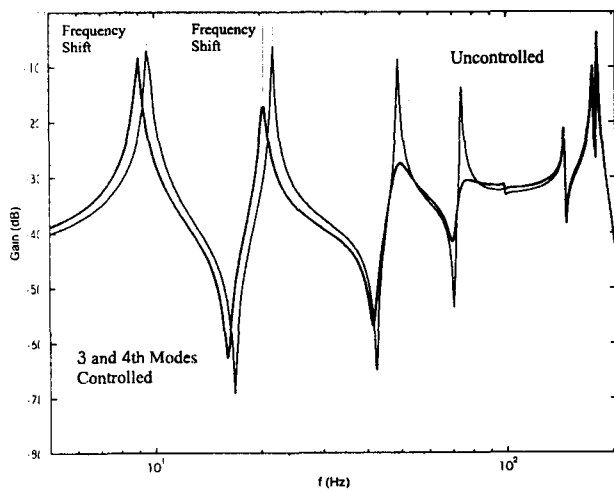
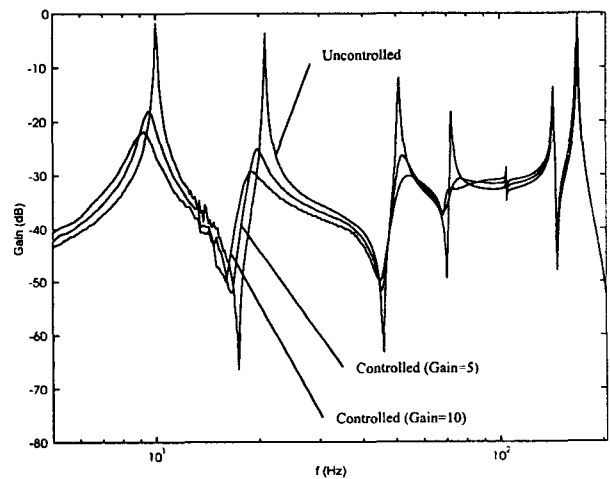


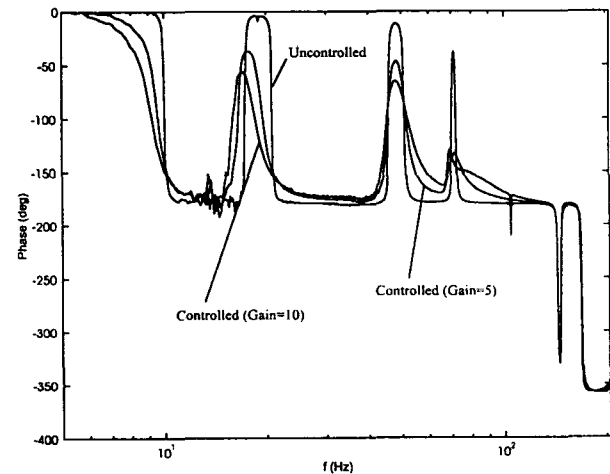
Fig. 4 Frequency shift by the tuning of higher modes

변동을 보여주고 있다.

이와 같은 과정을 통하여 이득이 5 와 10 인 경우에 대하여 이론적인 계산을 수행하고 실험을 통하여 그 결과를 검증하였는데 실험 결과가 Fig. 5와 같다. Fig. 5에서 알 수 있듯이 다중 PPF 제어기를 통하여 4개의 모드에 대하여 20 dB의 이득 감소 효과를 얻을 수 있었다. 개인(gain)이 10인 경우의 터닝 주파수는 각각 8.39, 19.26, 49.2, 74.5 Hz로 주파수 이동이 첫 번째 두 번째 모드에 대하여 발생했음을 알 수 있다. Fig. 6은 개인 10의 PPF 제어기를 적용한 경우의 시간 응답을 보여주고 있다. 시간 응답은 격자 구조물의 위 부분에 충격을 가하여 얻어졌는데 이 경우 첫 번째와 두 번째 모드가 주로 가진 되게 된다. Fig. 6에서 보이는 맥놀이 현상은 서로



(a)



(b)

Fig. 5 Frequency response of the multiple PPF control

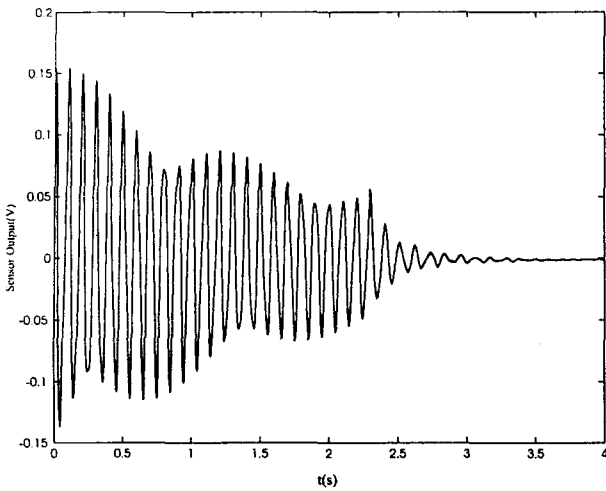


Fig. 6 Time response by the multiple PPF control (Gain=10)

근접해 있는 고유진동수로 인하여 나타나는데 Fig. 4에서 8차와 9차의 고유진동수가 매우 근접해 있음을 알 수 있다. PPF 제어기는 약 2.3초에서 켜졌는데 이후 진폭이 빠르게 감소함을 확인할 수 있다.

4. 수정 LQG 제어기의 설계

운동방정식 (1)로 부터 알 수 있듯이 n 자유도 집중계의 운동은 n 개의 이차 미분방정식으로 표현된다. 그러나 최적제어기와 같은 현대적인 제어기법은 모두 상태방정식에 근거하고 있기 때문에 n 개의 이차 운동 미분 방정식을 $2n$ 개의 일차 미분 방정식으로 변환하여야 한다. 참고로 성능지수가 quadratic 형태인 최적제어기의 경우 이득은 행렬대수 Riccati 방정식의 해로부터 얻어진다^(14,16).

가끔 설계 제한 조건으로 페루프 응답이 최소한 어떤 수렴도를 지닐 수 있도록 만들어야 할 경우가 있다. 이 경우 Pole Placement 기법을 이용하여 조건을 만족시킬 수 있으나 Pole Placement 기법을 이용하여 이득을 구하는 과정이 복잡하다. 이와는 달리 최적제어기는 설계과정이 간단하기는 하나 상태변수에 대하여 어떤 수렴도를 부과할 수 없으며 최적 제어기의 적용결과가 만족스럽지 못한 경우 성능지수의 Q 와 R 행렬을 재조정하여 결과를 재확인하여야 한다. 이와 같은 단점을 개선하기 위하여 Anderson과 Moore가 수렴도를 부과할 수 있는 새로운 형태의 최적제어기법을 제시하였다^(15,16). 이들이 개발한 방법을 진동제어에 적용하면 변위뿐만 아

니라 속도에도 제한을 부과하게 되어 필요 없는 제한 조건을 남용하는 결과가 된다. 이러한 점을 개선하여 Kwak⁽¹⁷⁾이 변위에만 수렴도를 부과하는 방법을 제시하였다. 본 논문에서는 Kwak⁽¹⁷⁾이 개발한 방법을 확장하여 모달 공간상의 운동 미분방정식에 대하여 각각의 모달 변위에 수렴도를 부과할 수 있는 새로운 형태의 최적제어기를 설계하고 이를 LQG 기법을 이용하여 구현하였다.

수렴도를 부과하기 위해서 먼저 다음과 같은 보조 변수를 도입하여 보자.

$$\xi = e^{at}q, \quad u = e^{at}v_a \tag{14}$$

식 (14)로부터 ξ 가 수렴하게 되면 q 는 e^{-at} 가 곱해져 더욱 빠르게 수렴하게 됨을 알 수 있다. 또한 식 (14)로부터 다음과 같은 관계식을 유도할 수 있다.

$$e^{at}\dot{q} = \dot{\xi} - a\xi, \quad e^{at}\ddot{q} = \ddot{\xi} - 2a\dot{\xi} + a^2\xi \tag{15}$$

식 (2)에 e^{at} 를 곱하고 식 (14)와 (15)를 이용하면 다음과 같이 변환된 방정식을 얻을 수 있다.

$$\dot{\xi} + 2(Z\Omega - aI)\dot{\xi} + (\Lambda - 2aZ\Omega + a^2I)\xi = U^T B_a u \tag{16}$$

식 (16)은 변환된 운동 이차 미분 방정식을 나타내는데 이를 다시 상태방정식으로 변환하면 다음과 같이 된다.

$$\dot{z} = Az + Bu \tag{17}$$

여기서 $z = [\xi \ \dot{\xi}]^T$ 이고

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -(\Lambda - 2aZ\Omega + a^2I) & -2(Z\Omega - aI) \end{bmatrix}, \tag{18}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ U^T B_a \end{bmatrix}$$

이와 같은 상태방정식에 대하여 다음과 같은 성능지수를 고려해 보자.

$$J = \frac{1}{2} \int_0^\infty e^{2at} (v_a^T R v_a + \eta^T Q \eta) dt \tag{19}$$

여기서 $\eta = [q^T \ \dot{q}^T]^T$ 는 원래 시스템의 상태 벡터를 나타내고 R 은 2×2 의 실수 대칭 양정수 행렬, Q 는 8×8 의 실수의 양반정수 행렬을 나타낸다. 지수가 포함된 성능지수는 제어벡터의 성능에 좀더 제한을 가하게 된다. 식 (14)를 고려하면 식 (19)는

다시 다음과 같이 표현된다.

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (u^T R u + z^T \bar{Q} z) dt \quad (20)$$

여기서

$$\bar{Q} = \begin{bmatrix} Q_{11} - \alpha Q_{12} - \alpha Q_{21} + \alpha^2 Q_{22} & Q_{12} - \alpha Q_{22} \\ Q_{21} - \alpha Q_{22} & Q_{22} \end{bmatrix} \quad (21)$$

이와 같은 성능지수와 변환된 상태방정식을 이용하면 최적제어 법칙이 다음과 같이 표현된다.

$$u = -R^{-1} B^T P z = -G_p \xi - G_v \dot{\xi} \quad (22)$$

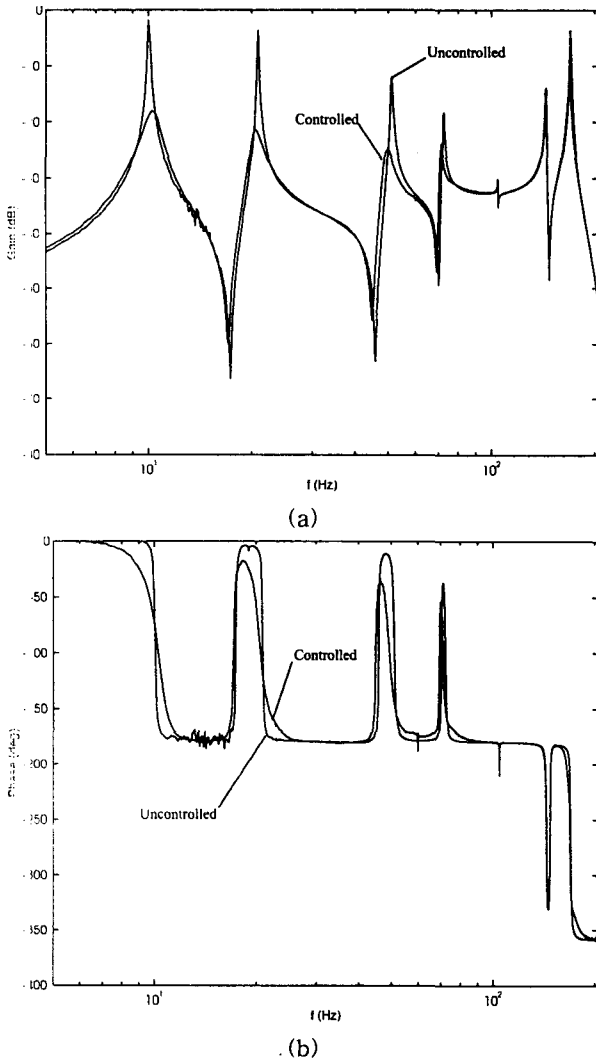


Fig. 7 Frequency response function by the modified LQG control

여기서 P 는 정상상태 행렬 대수 Riccati 방정식의 해이다.

$$PA + A^T P - PBR^{-1} B^T P + Q = 0 \quad (23)$$

식 (14)를 이용하면 최종적인 최적제어는 다음과 같이 표현된다.

$$v_a = -(G_p + \alpha G_v)q - G_v \dot{q} \quad (24)$$

본 연구에서는 $\alpha = 5.0$, $Q = 10^5 I$, $R = 10^{-2} I$ 를 이용하여 최적제어이득 행렬을 계산하고 최종적인 제어법칙, 식 (24)를 구현하였다. 본 연구의 계산은 MATLAB을 이용하여 수행되었다.

식 (24)를 실제로 적용하기 위해서는 압전감지기 계측값, V_s 로부터 q 와 \dot{q} 를 평가해야 한다. 본 연구에서는 이를 위하여 Kalman Filter를 이용하였다. Kalman Filter에 사용된 계수행렬들은 $Q_k = 10^2 I$, $R_k = I$ 가 사용되었다. 이득계산은 ATLAB을 이용하여 수행되었고 Estimator와 제어기는 C code로 프로그래밍 하여 실험을 수행하였다. 본 연구에서 개발한 수정 LQG를 적용한 실험 결과가 Fig. 7에 보여지고 있다. Fig. 7로부터 4개의 모드가 성공적으로 제어되었음을 알 수 있다. 그러나 계산량의 증가로 인하여 다중 PPF 제어에 비하여 Sampling Speed는 2 kHz로 감소시켜야 되었다.

Fig. 8은 수정 LQG 제어를 적용한 시간응답결과를 보여주고 있는데 약 2초에서 제어가 켜졌으며 이후 진폭이 급격하게 감소함을 확인할 수 있다.

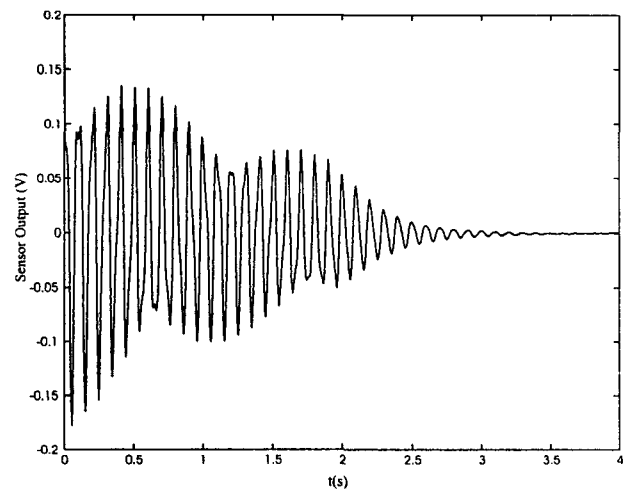


Fig. 8 Time response by the modified LQG control

5. 토의 및 결론

본 논문에서는 지능 구조물의 능동진동제어를 위하여 고전적인 제어 이론에 입각한 다중 PPF 제어기와 상태방정식에 근거한 수정 LQG 제어기 설계의 설계 방법을 개발하고 두 제어기의 성능을 비교하였다. 본 연구에서 고려한 지능구조물은 압전 감지기와 작동기를 부착한 복합재 격자 구조물로서 이와 같은 실제 구조물을 이용하여 본 연구에서 개발한 제어기의 타당성을 입증하였다.

본 논문에서는 먼저 pseudo inverse 기법에 근거한 다중 PPF 제어기에 대한 설계 방법 및 다중 PPF 제어기의 문제점인 주파수 이동에 관한 해결책이 소개되었다. 본 논문에서 개발한 다중 PPF 제어기를 사용하면 실제 감지기와 작동기의 수보다 많은 수의 모드를 제어할 수 있다. 또한 디지털화하였을 경우 PPF 제어회로의 단순함으로 인하여 빠른 sampling 시간을 사용할 수 있어 보다 많은 수의 진동모드를 제어할 수 있다. 그러나 PPF 제어기의 적용으로 인하여 페루프 시스템의 고유진동수 변동이 있어 PPF 제어기를 정확하게 조정하는 문제가 발생한다. 이 문제는 구조물의 고유진동 특성을 실험이나 이론으로 먼저 구하면 해결할 수 있다. 실험 결과 다중 PPF 제어기가 성공적으로 4개의 모드를 제어함을 알 수 있었다.

본 논문에서는 다음으로 기존의 LQR 제어방법에 응답의 감소율을 포함시켜 제어 성능을 예측할 수 있도록 수정 LQG 제어기를 개발하였다. 그러나 변형을 감지기인 압전감지기로는 속도를 계측할 수 없기 때문에 Kalman Filter를 추가하여 수정 LQG 제어기를 설계 하였다. 수정 LQG 제어기의 장점은 이론적인 상태 방정식이 제공되는 경우 강인한 제어를 설계할 수 있으며 응답이 미리 정한 감소율에 의하여 제어되기 때문에 보다 안정적이라는 것이다. 또한 감소율을 사용자가 임의로 결정할 수 있기 때문에 원하는 진동억제를 미리 결정할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 LQG 방법은 속도감지기를 추가로 필요로 하기 때문에 observer가 포함되어야 하고 이로 인해 다중 PPF 제어기보다 연산 작용이 많아 sampling 시간을 늦추어야 한다는 단점이 있다. 또한 LQG 제어기의 설계를 위해서 반드시 실제와 근접한 이론 모델이 있어야 한다는 단점이 있다. 실험 결과 수정 LQG 제어기 역시 4개의 모드를 제어할 수 있음을 알 수 있었다.

앞에서 언급하였듯이 고전적인 제어기로 분류되는 다중 PPF 제어기와 현대적인 제어기로 분류되는 수정 LQG 제어기 모두 능동진동제어에 효과적으로 사용될 수 있음을 알 수 있다. 그러나 이들 두 제어기를 몇 가지 면에서 비교하여 보는 것이 좋을 것 같다.

두 제어기를 설계 관점에서 비교하여 보면 다중 PPF 제어기는 이론 모델이 제공되지 못하는 상황에서도 설계가 가능하다. 특히 동위치 시스템인 경우 PPF 제어기는 비중앙화 제어 개념에 의하여 각각의 진동모드를 제어하도록 설계될 수 있다. 물론 고유진동수를 정확히 알고 있어야 하지만 고유진동수는 실험을 통하여 쉽게 알 수 있기 때문에 큰 문제가 안 된다. 반면에 수정 LQG 제어기는 최적 제어 이득 행렬 계산과 Observer 구성에 있어 비교적 정확한 모델을 필요로 한다. 정확한 이론 모델이 있는 경우 강인성을 보장받을 수 있다는 장점이 있지만 정확한 모델을 유도한다는 것은 사실상 불가능하기 때문에 모델의 불확실성에 대처할 수 있는 강인성 문제를 제어기 설계 시작부터 고려해야 한다.

실제 적용면에서 살펴보면 다중 PPF 제어기는 아날로그 회로나 디지털 마이크로 프로세서를 구성하여 적용할 수 있으나 수정 LQG 제어기는 아날로그 회로로 구현할 수 없다. 아날로그 회로를 사용하는 경우 sampling rate로 인해 발생하는 여러 가지 문제를 피할 수 있기 때문에 훨씬 효과적이고 제작이 단순하기 때문에 실용성이 높다고 말할 수 있다. 본 논문에서 개발한 다중 PPF 제어기는 실제로 OP 앰프를 이용한 아날로그 회로로 구현이 가능하다. 본 논문에서는 두 제어기 모두 디지털화 하여 계산식을 C 프로그램으로 변환하고 DSP Chip에 저장하여 실험을 수행하였다. 디지털화 과정에서 수정 LQG 제어기가 observer 식을 포함하여야 하기 때문에 계산 양이 증대되었고 이로 인해 sampling rate를 2 kHz로 낮추어야 했다. 다중 PPF 제어기의 경우 10 kHz의 sampling rate가 사용되었는데 sampling rate이 높은 것이 바람직하기 때문에 디지털화 과정에서도 다중 PPF 제어기가 다소 우세하다고 말할 수 있다. 그러나 지능 격자 구조물의 4번째 고유진동수가 70 Hz 이기 때문에 1 kHz이상의 sampling rate 이면 충분히 4 모드 진동 제어가 가능하다. 따라서 본 연구에서 다른 구조물에 대해서는 이러한 sampling rate의 영향이 나타나지 않았다.

최종적인 진동억제 성능은 증폭앰프의 이득에 의해서 조절될 수 있기 때문에 어느 제어기가 진동억

제 성능이 좋은가는 판단하기 어렵다. 증폭앰프의 이득을 올려가면서 안정성을 조사할 수도 있겠지만 이에 관한 연구를 차후의 연구과제로 남겨 두었다. 이러한 관찰을 종합하여 볼 때 다중 PPF 제어기가 수정 LQG 제어기보다 실용상 우수하다고 말할 수 있겠다.

후 기

본 연구는 '96년도 한국과학재단의 핵심전문연구과제 (과제번호 961-1001-003-2)의 일부 지원을 받아 수행되었다. 본 연구의 실험 구조물은 건국대학교 항공우주공학과와 윤광준 교수의 도움으로 제작되었으며 진동제어 실험은 신태식, 라완규의 도움으로 수행되었다. 지면을 빌어 관계자 분들께 감사 드린다.

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) 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.
- (5) 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.
- (6) 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.
- (7) 윤광준, 이영재, 김철수, 1994, "압전세라믹과 폴리머 센서를 이용한 유리/에폭시 복합재료 외팔보의 능동억제", *한국복합재료과학회지*, 제 7 권, 제 1 호, pp. 48~56.
- (8) 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.
- (9) 광문규, 1995, "압전재료를 이용한 지능구조물의 능동진동제어", *한국소음진동공학회지*, 제 5 권, 제 3 호, pp. 292~302.
- (10) Denoyer, K.K. and Kwak, M.K., 1996, "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.
- (11) 라완규, 광문규, 윤광준, 1997, "압전감지기와 작동기를 이용한 복합재료 격자 구조물의 능동진동 제어," *한국항공우주학회지*, 제 25 권 제 5 호, pp. 76~85.
- (12) 광문규, 라완규, 윤광준, 1997, "PPF와 SRF 조합제어기법을 사용한 지능구조물의 능동진동제어," *한국소음진동공학회지*, 제7권 제 5호, pp. 811~817.
- (13) Kwak, M. K., Ra, W.-K., and Yoon, K.-J., 1997, "Active Vibration Suppression of a Smart Grid Structure by the Multiple Positive Position Feedback Control," *Asia-Pacific Vibration Conference '97*, Kyongju, Korea, pp. 1271~1276.
- (14) Potter, J. E., 1966, "Matrix Quadratic Solutions," *SIAM Journal of Applied Mathematics*, Vol. 14, No. 3, 496~501.
- (15) Anderson, B. D. O. and Moore, J. B., 1969, "Linear System Optimization with Prescribed Degree of Stability," *Proc. IEE*, Vol. 116, No. 12, pp. 2083~2087.
- (16) Anderson, B. D. O. and Moore, J. B., 1990, *Optimal Control: Linear Quadratic Methods*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- (17) Kwak, M.K., 1991, "Optimal Control of Flexible Structures with the Prescribed Decay Rate", *ASME Winter Annual Meeting*, 91-WA-DSC-2.