

## 양변위 되먹임 제어기의 안정성, 제어 성능 및 설계 방법

### The Stability Conditions, Performance and Design Methodology for the Positive Position Feedback Controller

곽 문 규<sup>†</sup> · 한 상 보\* · 허 석\*\*

Moon K. Kwak, Sang-Bo Han and Seok Heo

(2003년 9월 20일 접수 ; 2004년 2월 8일 심사완료)

**Key Words** : Positive Position Feedback Controller(PPF제어기), Active Vibration Control(능동진동제어), Routh-Hurwitz Criterion(루스-허비츠 판별법)

#### ABSTRACT

This paper is concerned with the theoretical estimation of the single-input single-output(SISO) positive position feedback(PPF) controller and the derivation of the stability conditions for the multi-input multi-output (MIMO) PPF controller. Although the stability condition for the SISO PPF controller was derived in the earlier works, the question regarding the performance estimation of the SISO PPF controller has never been studied theoretically. Hence, the SISO PPF controller for the single degree-of-freedom system was first investigated and then control parameters including gain, the filter frequency, and the damping factor of the PPF controller were analyzed in detail thus providing the design methodology for the SISO PPF controller. In the case of real structure, there are infinite number of natural modes so that some modes are to be controlled by a limited number of actuator and sensor. Based on the theoretical results on the SISO PPF controller, the stability condition for the multi-input multi-output PPF controller was derived when only the few number of modes are to be controlled. The control spillover problem is also discussed in detail.

#### 1. 서 론

지능구조물의 능동제어에 있어서 피드백제어 시스템에 근거하여 다양한 제어기가 설계되어 활용되고 있지만 그 중 실용성과 효과면에서 인정을 받고 있는 제어기가 양의 변위 되먹임(positive position feedback, PPF) 제어기이다.

PPF 제어기는 Fanson and Caughey<sup>(1)</sup>가 제안한

이래 지능구조물의 능동진동제어기로 성공적으로 사용되고 있다. 그 이유는 제어기를 아날로그 회로로 간단하게 구현할 수 있고 디지털 알고리즘으로 변환했을 경우에도 다른 알고리즘에 비해 간단하게 디지털 제어기를 설계할 수 있기 때문이다. 또한 제어하고자 하는 진동모드를 선별하여 제어할 수 있으며 이 경우 다른 진동모드를 불안정하게 만드는 Spillover 현상이 나타나지 않는다. PPF 제어기를 이용한 많은 연구들 중에 Baz<sup>(2-4)</sup>등의 연구는 1자유도계 이론을 확장하여 트러스구조물의 진동을 억제하기 위한 압전 세라믹 작동기를 쌓아올린 형태의 작동기를 사용하고 제어기법으로는 independent modal space control (IMSC) 개념에 입각하여 각 모드를 제어하는 modal positive position feedback 제어기법을 사용하였다.

<sup>†</sup> 책임저자 : 정회원, 동국대학교 기계공학과  
E-mail : kwakm@dgu.edu.ac.kr

Tel : (02) 2260-3705, Fax : (02) 2263-9379

\* 정회원, 경남대학교 기계자동차공학부

\*\* 정회원, Univ. of Nevada, Reno 기계공학과

denoyer and kwak<sup>(5)</sup>은 외팔보에 대한 MIMO PPF 제어기 적용문제를 논하였으며 이외에 PPF 제어기를 진동문제에 응용한 많은 연구결과가 있고<sup>(6,7)</sup>, PPF 제어기의 중요한 문제점 중의 하나인 조정문제를 실시간으로 해결해 보려는 노력<sup>(8-10)</sup>도 진행 중이다.

본 연구에서는 Fanson and Caughey가 유도했던 단일 입출력(single-input single-output, SISO) PPF 제어기의 안정조건을 분석하고, 더 나아가서 SISO PPF 제어기의 이득, 필터 주파수, 감쇠인자에 의한 페루프 시스템의 동적 특성을 조사하였다. 이와 같은 이론 결과를 바탕으로 SISO PPF 제어기의 설계 방법을 제시하였다.

우리가 제어하고자하는 구조물은 무한개의 고유진동 모드를 가지고 있다. 따라서 제한적인 감지기와 작동기를 가지고는 몇 개의 고유진동모드만을 제어할 수 있는데 본 연구에서는 몇 개의 모드를 PPF 제어기로 제어하는 경우인 다중 입출력(multi-input multi-output, MIMO) PPF 제어기를 고려하여 MIMO PPF 제어기의 설계 방법과 안정 조건을 유도하였다. 또한 MIMO PPF 제어기를 설계하는 경우에 발생하는 문제점을 조사하였다.

## 2. SISO PPF 제어기의 안정성 및 제어 특성

SISO PPF 제어기가 연결된 일자유도 진동계에 대한 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \ddot{q} + 2\zeta\omega_n\dot{q} + \omega_n^2q &= g\omega_n^2f + \omega_n^2d \\ \dot{f} + 2\zeta_f\omega_f\dot{f} + \omega_f^2f &= g\omega_f^2q \end{aligned} \quad (1a,b)$$

여기서  $q$ 는 일자유도 진동계의 변위를 나타내며,  $f$ 는 PPF 제어력을 나타낸다.  $\zeta, \omega_n$ 는 진동계의 감쇠인자와 고유진동수이며  $\zeta_f, \omega_f$ 는 PPF 제어기의 감쇠인자와 필터 주파수를 나타낸다.  $g$ 는 이득을 나타내며  $d$ 는 외부 교란을 나타낸다. 외부교란에 대한 진동응답에 대한 전달함수를 유도하면 다음과 같다.

$$G(s) = \frac{Q(s)}{D(s)} = \frac{(s^2 + 2\zeta_f\omega_f s + \omega_f^2)\omega_n^2}{det(s)} \quad (2)$$

여기서

$$det(s) = s^4 + 2(\zeta\omega_n + \zeta_f\omega_f)s^3$$

$$\begin{aligned} &+ (\omega_n^2 + \omega_f^2 + 4\zeta\zeta_f\omega_n\omega_f)s^2 \\ &+ 2\omega_n\omega_f(\zeta\omega_f + \zeta_f\omega_n)s + \omega_n^2\omega_f^2(1 - g^2) \end{aligned}$$

이 시스템에 대해 Routh-Hurwitz 조건을 적용하여 안정조건을 유도해 보면 다음과 같은 결과가 유도된다.

$$g < 1 \quad (3)$$

따라서 PPF 제어기는 정적안정성이 보장된다고 말할 수 있다. 즉, 안정성은 주파수에 상관없이 오로지 이득에만 의존하는 것을 알 수 있다. 따라서 이득을 작게 하면 안정성이 무조건 보장된다고 말할 수 있다.

Fig. 1은 SISO PPF 제어기의 필터주파수,  $\omega_f$ 를  $\omega_n$ 에 맞춘 경우에 대해 주파수응답곡선이 이득값의 변화에 따라 어떻게 변화하는지 보여주고 있다. 이득이 커지는 경우 공진시의 응답이 작아지는 반면에 공진주파수보다 작은 주파수 영역에서는 응답이 커진다. 이것은 PPF 제어기가 필터 주파수보다 낮은 영역에 대해 양의 위치 되먹임으로 인해 강성이 저하되기 때문에 나타나는 현상이다. 즉, 이득을 크게하면 정적 불안정이 발생할 수 있다.

앞에서 구한 전달함수를 무차원 변수를 도입해 간략화해보자. 이를 위해  $s = i\omega, r = \omega/\omega_n, p = \omega_f/\omega_n$ 를 도입하면 전달함수는 다음과 같이 표현된다.

$$G(\omega) = \frac{p^2 - r^2 + i(2\zeta_f pr)}{W} \quad (4)$$

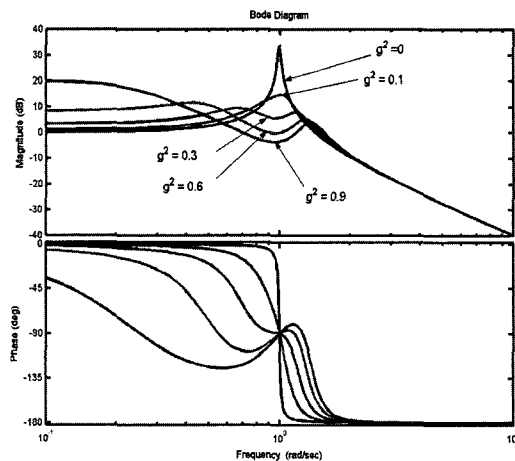


Fig. 1 Frequency response plots for closed-loop system via SISO PPF controller

여기서

$$W = [r^4 - (1 + p^2 + 4\zeta\zeta_f p)r^2 + p^2(1 - g^2)] + i2[-(\zeta + \zeta_f p)r^2 + (\zeta p^2 + \zeta_f p)r]$$

PPF 제어기를 고유진동수에 맞춘다면  $p=1$  이되며 관심의 대상인 공진진폭을 고려한다면  $r=1$  인 경우의 전달함수 크기를 계산하면 된다. 이 경우 공진 진폭은 다음과 같이 표현된다.

$$|G| = \frac{1}{2\zeta(1 + g^2/4\zeta\zeta_f)} \quad (5)$$

공진시의 진폭과 감쇠인자와의 관계식을 고려한다면 PPF 제어기에 의한 페루프 시스템의 감쇠 인자는 다음과 같이 표현된다.

$$\zeta_c = \zeta + \frac{g^2}{4\zeta_f} \quad (6)$$

만일  $\zeta_f=0.3$  으로 하고  $g^2=0.1$  이라고 하면 약 8.3 %의 감쇠인자가 증가되고 공진 진폭이 약 1/10로 감소되는 것을 알 수 있다. 이것은 보드선도 상에서 약 20 dB의 감소를 나타내게 된다. 물론 이득값이 커지면 페루프 시스템의 감쇠인자도 커지고 진폭도 그 만큼 작아지게 되지만 앞에서 설명한 바와 같이 저주파수 대역에서의 제어성능이 나빠지게 된다.

PPF 제어기를 적용하는데 있어 가장 어려운 점은 최적의  $\zeta_f$ 와  $p$ 의 선택이다. 즉, PPF 제어기의 감쇠 인자와 필터주파수의 선정이다. 앞에서 우리는 SISO PPF 제어기의 필터 주파수를 대상 고유진동수에 맞추므로써 감쇠를 증가시킬 수 있음을 알 수 있었으며 감쇠의 증가는 이득을 증가시킴으로 얻어짐을 확인하였다. 또한, 이 경우에  $\zeta_f$ 를 작게하면 이득을 작게 하더라도 더 큰 효과를 얻을 수 있음을 알 수 있었다. 따라서 실제 적용에 있어 어떤  $\zeta_f$ 와  $p$  값이 최적인가에 대한 의문이 발생한다. 이에 대해서는 연구된 바가 없지만 현재까지  $\zeta_f=0.3$ 을 보편적으로 사용하고 있다. 그 이유는 PPF 제어기의 위상차가 90도 되는 지점을 정확히 조정하기 어렵기 때문에 되도록 제어할 수 있는 주파수 대역을 넓히기 위함이며 이득은 페루프 시스템의 성능을 확인하면서 조정하고 있다. 이런 설계 방법에 대해 이론적으로 설명된 바가 없기 때문에 본 연구에서는 몇 가지 경우를 고려

하여 수치해석을 통해 그 타당성을 확인해보고자 한다. 이를 위해 본 연구에서는 이득과  $\zeta_f$ 에 따라 최적의 필터 주파수가 어떻게 변화하는지 조사하였다. Fig. 2부터 Fig. 4는 이득이 0.2, 0.3, 0.4로 변함에 따라 주파수응답곡선의 최대점이 PPF 제어기의 필터주파수에 따라 어떻게 변화하는지 보여주고 있다. Fig. 2를 살펴보면  $\zeta_f$ 를 작게하고 최적의 필터주파수를 이용하면 가장 큰 감쇠 효과를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 그러나 최적의 필터 주파수를 사용하지 않으면 오히려  $\zeta_f$ 가 큰 값일 때보다 좋지 않은 결과를 줄 수 있음을 알 수 있다. Fig. 3을 살펴보면 이득이 증가됨으로 인해 공진주파수 근처에서의 감쇠 효과가 개선됨을 알 수 있다. 또한  $\zeta_f=0.1$ 인 경우보다  $\zeta_f=0.2$ 인 경우가 오히려 좋은 결과를 가져옴을 알 수 있다. 그러나 민감도 관점에서 살펴보면  $\zeta_f=0.3$

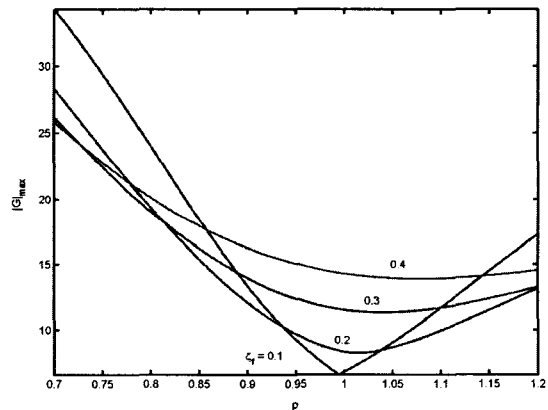


Fig. 2 Tuning frequency vs. maximum response ( $g=0.2$ )

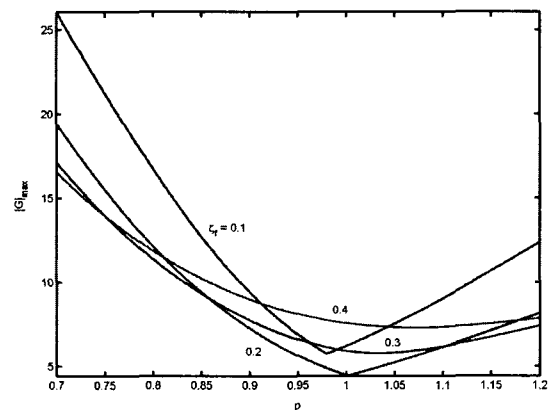


Fig. 3 Tuning frequency vs. maximum response ( $g=0.3$ )

이 오히려 현실적일 수 있음을 알 수 있다. Fig. 4를 살펴보면 이득을 키움으로써 전반적인 감쇠 효과가 증대됨을 알 수 있다. 여기서는  $\zeta_f=0.3$ 이 가장 좋은 결과를 줌을 알 수 있는데 필터 주파수도 대상 고유진동수 근처에 맞추면 충분히 성능을 발휘함을 알 수 있다. 이득이 이보다 커지면 Fig. 1에서 알 수 있듯이 대상 고유진동수보다 낮은 주파수 대역에서의 성능이 떨어진다. 따라서  $\zeta_f=0.3$ 과  $g=0.3$ 이 추천되는 값이라고 말할 수 있다.

SISO PPF 제어기의 전달함수는 저주파수 통과 필터와 동일함을 알 수 있는데 그 보드선도를 살펴보면 저주파수 통과 필터의 특성상 필터주파수 보다 큰 주파수를 가지는 신호는 걸러지게 됨을 알 수 있다. 따라서 필터주파수보다 큰 고유진동수를 가지는 진동 모드에는 아무런 영향을 주지 않는다. 그러나 필터주파수보다 낮은 주파수에는 영향을 주게되며 이로 인해 이득이 큰 경우 정적 불안정성이 나타날 수 있다. 이를 좀더 구체적으로 살펴보자. 식 (1a,b)에서  $\omega_f > \omega_n$ 인 경우를 고려하면 식 (1b)는 다음과 같이 가정할 수 있다.

$$f \approx ga \tag{7}$$

이식을 식 (1a)에 대입하면 다음과 같은 식이 유도된다.

$$\ddot{q} + 2\zeta\omega_n \dot{q} + \omega_n^2(1-g^2)q = \omega_n^2 d \tag{8}$$

따라서, 만일 PPF 필터 주파수보다 낮은 주파수

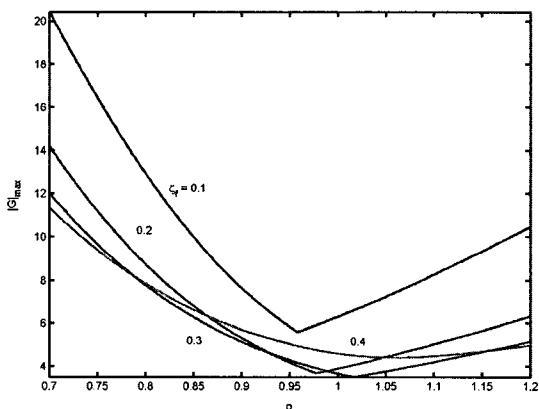


Fig. 4 Tuning frequency vs. maximum response ( $g=0.4$ )

대역에 있는 고유진동 모드들은 PPF 제어기의 이득이 커짐에 따라 고유진동수가 저하되는 것을 알 수 있다. 이 것은 PPF 제어기에서 나타나는 Control Spillover 현상이다. 즉, 다중입출력 PPF 제어기를 설계하는 경우에 고차의 고유진동모드에 PPF 제어기를 적용하면 이보다 낮은 진동수를 가지는 고유진동수들이 약간씩 감소된다는 것이다. 따라서 최적의 성능을 얻기 위해서는 먼저 고차모드부터 PPF 제어기를 적용하고 Control Spillover로 인한 저차의 고유진동 모드 변화를 고려해 저차의 PPF 제어기를 단계적으로 설계해야 한다.

### 3. MIMO PPF 제어기의 설계 및 안정성

SISO PPF 제어기에 대해서는 이론적으로 깊은 연구가 이루어졌지만 MIMO PPF 제어기의 안정성과 설계방법에 대해서는 논의된바가 없다. 특히 제한적인 제어기와 감지기를 가지고 일부 고유모드를 제어하고자 하는 경우에 대해서는 연구된바가 없다. 본 연구에서는 이에 대해 조사해보고자 한다.

만일,  $n$ 개의 진동모드를  $n$ 개의 작동기와  $n$ 개의 감지기를 이용해 제어한다고 하자. 이 경우 운동방정식은 다음과 같이 쓰여질 수 있다.

$$\begin{aligned} \ddot{q} + 2Z\Omega_n \dot{q} + \Lambda_n q &= G\Lambda_n Q \\ \dot{Q} + 2Z_f \Omega_n Q + \Lambda_n Q &= G\dot{\Lambda}_n q \end{aligned} \tag{9}$$

이식을 행렬형태로 표현하면

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} \ddot{q} \\ \dot{Q} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 2Z\Omega_n & 0 \\ 0 & 2Z_f \Omega_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{q} \\ Q \end{Bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} \Lambda_n & -G\Lambda_n \\ -G\dot{\Lambda}_n & \Lambda_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q \\ Q \end{Bmatrix} &= \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \end{aligned} \tag{10}$$

이런 시스템의 안정성은 다음 행렬이 positive definite이면 안정이 된다. 즉,

$$\begin{bmatrix} \Lambda_n & -G\Lambda_n \\ -G\dot{\Lambda}_n & \Lambda_n \end{bmatrix} > 0 \tag{11}$$

이에 대한 안정조건은 다음과 같이 유도된다.

$$(I - G^2)\Lambda_n > 0 \tag{12}$$

따라서  $G^2 < I$ 이면 시스템은 안정이다. 그러므로

이득이 충분히 작은 경우 시스템은 안정이다. 이 조건은 진동 모드 개수와 동일한 작동기와 감지기로 제어하는 경우에만 적용된다. 구조물은 무한개의 고유진동모드를 포함하고 있으므로 제한적인 개수의 작동기와 감지기로 모두를 제어한다는 것은 불가능하다. 따라서 일부 고유 모드만을 제어한다고 하면 안정조건은 달라지게 된다. 진동모드를 제어할 모드와 제어하지 않을 모드로 구분하고 운동방정식을 구분해보자.

$$\begin{aligned} \ddot{q}_c + 2Z_c \Omega_c \dot{q}_c + \Lambda_c q_c &= B_{ac} v_a \\ \ddot{q}_u + 2Z_u \Omega_u \dot{q}_u + \Lambda_u q_u &= B_{au} v_a \\ v_s &= B_{sc} q_c + B_{su} q_u \\ Q_c + 2Z_f \Omega_c \dot{Q}_c + \Lambda_c Q_c &= G \Lambda_c \overline{q}_c \\ v_a &= B_{ac}^{-1} G \Lambda_c Q_c, \quad \overline{q}_c = B_{sc}^{-1} v_s \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 아래첨자  $c$ 와  $u$ 는 각각 제어 대상 모드와 비제어 대상 모드를 구분하기 위해 도입되었다.

식 (13)을 행렬식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} \dot{q}_c \\ Q_c \\ \dot{q}_u \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 2Z_c \Omega_c & 0 & 0 \\ 0 & 2Z_f \Omega_c & 0 \\ 0 & 0 & 2Z_u \Omega_u \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_c \\ Q_c \\ q_u \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \Lambda_c & -G \Lambda_c & 0 \\ -G \Lambda_c & \Lambda_c & -G \Lambda_c B_{sc}^{-1} B_{su} \\ 0 & -B_{au} B_{ac}^{-1} \Lambda_c G & \Lambda_u \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_c \\ Q_c \\ q_u \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (14)$$

여기서 안정성에 대한 조건을 유도하기 위해 작동기와 감지기가 서로 동위치에 존재한다고 가정하자. 이 경우 다음과 같은 관계가 성립된다.

$$B_{ac} = B_{sc}^T = B_c^T, \quad B_{au} = B_{su}^T = B_u^T \quad (15)$$

앞에서 사용한 안정조건을 구하는 방법을 사용하면 다음과 같은 결과가 유도된다.

$$(I - G^2 - G \Lambda_c B_c^{-1} B_u \Lambda_u^{-1} B_u^T B_c^{-T} G) \Lambda_c > 0 \quad (16)$$

앞에서 유도했던 안정조건식 식 (12)와 비교해보면 추가항이 포함되어 있는 것을 알 수 있다. 만일 이득 행렬이 충분히 작다고 가정하고 저차의 고유진동모드를 제어한다고 하면 시스템은 안정이라고 말할 수 있다. 식 (16)에서 알 수 있듯이 안정조건은 정적이다. 즉 이득과 행렬에 의해 결정된다.

#### 4. MIMO PPF 제어기의 수치예제

MIMO PPF 제어기의 성능을 시험하기 위해 다음 그림과 같은 스프링-질량-댐퍼 시스템을 고려하였다. 여기서, 질량  $m_1 \sim m_4 = 1$  kg, 스프링상수  $k_1 \sim k_5 = 1$  KN/m 이고 감쇠계수  $c_1 \sim c_5 = 0.01$  로 설정하였다.

여기서 작동기와 감지기는 2번째와 4번째 질량에 부착되어 있다고 가정하자. 저차의 두 고유진동모드를 제어 대상으로 하고  $\xi_f = 0.3$ ,  $G = 0.3I$ 로 할 경우 Fig. 6과 같은 보드 선도가 얻어진다.

그림에서 알 수 있듯이 첫 번째와 두 번째 진동모드의 진폭이 대폭 감소되었음을 알 수 있다. 이득행렬을 증가시켜가면서 관찰한 결과  $G = 0.8I$ 가 되는 경우에 불안정해짐을 알 수 있었다. 따라서 이득행렬이 충분히 작을 경우에 안정성이 보장됨을 알 수 있다.

Fig. 7은 제어가 없는 경우와 PPF 제어기가 작동한 경우의 단위충격응답을 보여주고 있다. 그림으로

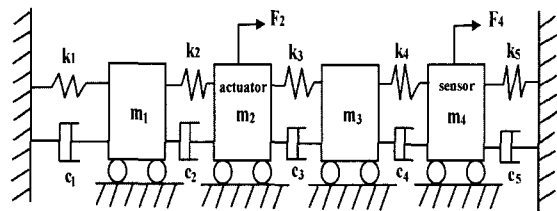


Fig. 5 Spring-mass-damper system

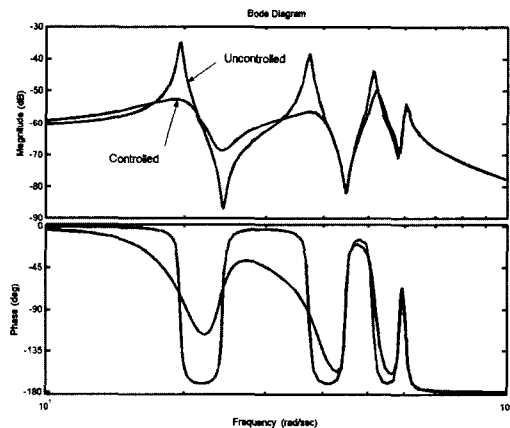


Fig. 6 Frequency response plots for closed-loop system

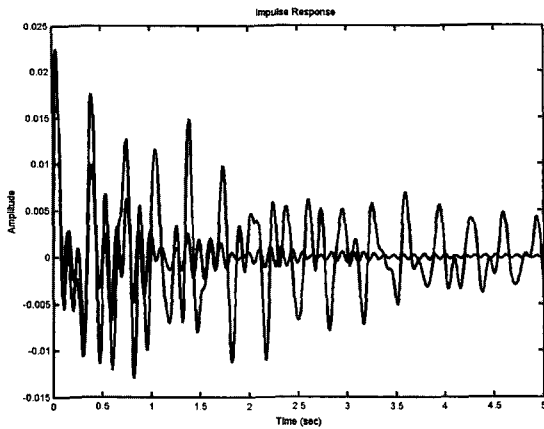


Fig. 7 Uncontrolled and controlled impulse responses

부터 PPF 제어기가 작동한 경우 응답이 빠른 시간 내에 감소됨을 알 수 있다. 그러나 고차의 잔류 진동 모드는 제어가 되지 않기 때문에 약간 남게 된다.

### 5. 결론

본 연구에서 먼저 SISO PPF 제어기의 안정성에 대해 논하고 PPF 제어기의 감쇠인자와 이득값에 의해 얻어지는 감쇠효과에 대한 이론식을 유도하였다. 또한, 경험적으로 사용하고 있는 PPF 제어기의 필터 주파수와 감쇠인자에 대해 조사하여 PPF 제어기를 설계하는데 있어 가장 합당한 값을 제안하였다. 그리고 필터 주파수가 관심 있는 고유진동수보다 큰 경우 control spillover 현상이 발생하여 이득이 클수록 진폭이 감소함을 이론적으로 입증하였다.

SISO PPF 제어기를 실제 시스템에 적용하는 경우 경험적으로 제안되었던 PPF 제어기의 필터 주파수와 감쇠인자에 대해 이론적으로 그 값이 타당함을 확인하였다.

그 동안 일자유도 시스템에 대한 SISO PPF 제어기의 안정조건이 제시되었지만 다자유도계에 MIMO PPF 제어기를 적용하는 경우의 안정조건에 대해서는 유도된 바가 없었다. 본 연구에서는 다자유도계의 일부 모드를 MIMO PPF 제어기를 적용하여 제어하는 경우에 대한 안정조건을 유도하였다. 그 결과, MIMO PPF 제어기의 안정조건은 정적이며 이득 행렬이 작은 경우에 보장됨을 확인할 수 있었다. 이론 결과의 타당성 조사를 위해 수치계산이 수행되었으며 수치계산 결과는 이론 예측과 일치함을 확인할 수 있었다.

### 후기

본 연구는 2002학년도 경남대학교 학술논문게재연구비 지원으로 이루어졌음.

### 참고 문헌

- (1) Fanson, J. L. and Caughey, T. K., 1987, "Positive Position Feedback Control for Large Space Structures," AIAA Journal, Vol. 28, No. 4, pp. 717~724.
- (2) Poh, S. and Baz, A., 1990, "Active Control of a Flexible Structure Using a Modal Positive Position Feedback Controller," Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 1.
- (3) Baz, A., Poh, S. and Fedor, J., 1992, "Independent Modal Space Control with Positive Position Feedback," Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 114, pp. 96~103.
- (4) Baz, A. and Hong, T. H., 1997, "Adaptive Control of Flexible Structures Using Modal Positive Position Feedback," International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, Vol. 11, pp. 231~253.
- (5) 박문규, 1998, "지능구조물의 능동진동제어를 위한 다중 PPF 제어기와 수정 LQG 제어기의 비교 연구," 한국소음진동공학회논문집, 제 8 권, 제 6 호, pp. 1121~1129.
- (6) 한상보, 박문규, 윤신일, 2001, "PZT와 PPF 제어기법을 이용한 다중모드 강제진동의 능동진동제어," 한국소음진동공학회논문집, 제 7 권, 제 6 호, pp. 1007~1013.
- (7) 신태식, 박문규, 2000, "유전자 알고리즘을 이용한 능동진동제어기의 실시간 조정," 한국소음진동공학회논문집, 제 10 권, 제 6 호, pp. 1083~1093.
- (8) 허석, 박문규, 2001, "유전자 알고리즘을 이용한 지능구조물의 PPF 제어기 실시간 다중변수 조정," 한국소음진동공학회논문집, 제 11 권, 제 1 호, pp. 147~155.
- (9) 허석, 이승범, 박문규, 백광현, 2004, "적응형 PPF 제어기를 이용한 지능구조물의 실시간 능동진동 제어," 한국소음진동공학회논문집 제 14 권, 제 4 호 게재.