

# 블록 역행렬 기법에 의한 다중입출력 양변위 되먹임제어기의 설계

## Design of Multi-Input Multi-Output Positive Position Feedback Controller based on Block-Inverse Technique

곽문규\*

Moon K. Kwak

**Key Words** : Multi-Input and Multi-Output Control(다중입출력제어), Positive Position Feedback Control(양변위되먹임제어기), Control Spillover(제어과잉),

### ABSTRACT

This paper is concerned with the active vibration control of a grid structure equipped with piezoceramic sensors and actuators. The grid structure is a replica of the solar panel commonly mounted on satellites, which contains complex natural mode shapes. The multi-input and multi-output positive position feedback controller is considered as an active vibration controller for the grid structure. A new concept, the block-inverse technique, is proposed to cope with more modes than the number of actuators and sensors. This study also deals with the stability and the spillover effect associated with the application of the multi-input multi-output positive position feedback controller based on the block-inverse technique. It was found that the theories developed in this study are capable of predicting the control system characteristics and its performance. The new multi-input multi-output positive position feedback controller was applied to the test structure using a digital signal processor and its efficacy was verified by experiments..

### 1. 서 론

지능구조물은 분포된 감지기와 작동기, 그리고 이들과 협력하여 진동 억제를 이루어내는 제어 시스템으로 이루어지는 것으로 정의된다. 개념적으로는 지능구조물이 외부 교란과 내부의 변화에 대응할 수 있어야 한다. 지능구조물의 감지기와 작동기로 사용되는 재료는 많이 있는데 압전 재료, 형상기억합금, ER 유체, MR 유체 등이다. 이들 재료들은 구조물에 부착되어 감지거나 작동기로 사용된다. 이 중 비교적 강성이 높고, 온도에 덜 민감하며 적용이 간편한 재료가 압전 세라믹 재료이다. 압전세라믹 재료에 전압이 가해지면 기계적인 변형이 일어나고, 반대로 기계적인 변형을 주면 전하가 발생한다. 이런 이유로 압전세라믹 재료는 감지기와 작동기로 모두 사용이 가능하다.

압전 감지기와 작동기를 이용해 지능구조물의 진동 제어에 대한 연구는 주로 보를 대상으로 진행되었다. Crawley[1,2]등은 압전세라믹 감지기와 작동기가 부착된 보의 모델링에 대해서 연구를 했으며, Hanagud[3]등은 유한

요소법을 사용하여 지능구조물을 모델링하고 모달 변위의 시간 변화율과 최적 제어를 제어기로 제안하였다. Fanson and Caughy[4]는 모달 변위에 근거한 양변위 되먹임(Positive Position Feedback, PPF) 제어기를 소개하였다. Poh and Baz[5]는 PPF 제어기를 독립모달공간제어기[6]의 개념을 도입해 다자유도계로 적용하였다. Friswell and Elnman[7]은 PPF 제어기와 출력되먹임 제어기의 관계에 대해 조사했다. PPF 제어기의 안정조건, 성능 및 설계 방법에 대해서는 곽[8]등이 조사했으며, 이외에도 많은 연구자들[9-11]이 다양한 형태의 지능구조물에 대한 제어 방법을 제시하였다.

PPF 제어기는 특정 진동 모드를 제어하는데 아주 효과적이다. PPF 제어기는 다른 모드들을 불안정하게 만들지 않으면서 목표로 삼은 진동수 대역의 감쇠를 확실하게 증가시킬 수 있다. 하나의 입력과 하나의 출력으로 이루어진 PPF 제어기는 저주파 통과 필터의 형태를 가지고 있어 아날로그 회로로 쉽게 구현된다[12]. 이런 이유로 PPF 제어가 지능구조물의 능동진동제어기로 선호되어왔다. 그러나 PPF 제어기의 단점은 고유 진동 특성이 이론이나 실험으로 미리 파악되어야 한다는 것인데 이 과정을 PPF 제어기를 조정하는 것이라고 말한다.

이 연구는 압전 감지기와 작동기를 장착하고 있는 복합

\* 동국대학교 기계공학과 교수, 정회원  
E-mail : kwakm@dongguk.edu  
Tel : (02) 2630-3705, Fax : (02) 2633-9379

재 격자구조물의 능동진동제어기 설계와 관련이 있다. 이 구조물은 이미 앞선 연구[13-15]에서 다루어졌는데 그림 1에 보이는 바와 같다. 이 구조물은 인공위성에 장착된 태양전지판과 비슷한 구조를 가지고 있다. 인공위성에 있어 자세와 가리킴 오차를 줄이기 위해 태양전지판은 반드시 제어되어야 한다. 복합재 격자 구조물은 두개의 압전감지기와 두개의 압전 작동기로 이루어져 있으며 이를 통해 능동진동제어기의 성능을 평가하도록 설계되었다.

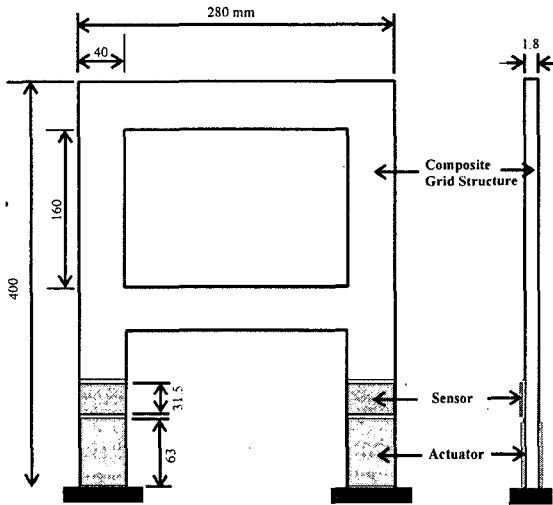


Fig. 1 Smart Grid Structure.

그림 1에서 보이는 바와 같이 제어 대상 구조물은 두개의 입력과 두개의 출력으로 이루어진 전형적인 다중입출력 시스템이다. 따라서 제어 문제는 무한개의 자유도를 가지는 구조물에 대해 유한개의 감지기와 작동기를 가지고 진동억제를 수행하여야 하는 과제라고 말할 수 있다. 앞선 연구 [15]에서 각각의 모달 변위에 대해 하나의 입출력을 갖는 PPF 제어기를 설계하고 이를 준역행렬 방법을 이용해 다중 입출력 PPF 제어기를 구성하는 방법을 제안하였다. 준역행렬 방법을 사용한 이유는 작동기 개수가 모달 제어기 개수보다 작았기 때문이다. 이 방법의 단점은 각각의 모드에 대한 제어력의 효과가 준역행렬 계산 과정에서 바뀐다는 것이다. 이런 단점을 보완하고 실제 제어력이 모달 제어력으로부터 예측 가능할 수 있도록 본 연구에서는 블록 단위의 역행렬 기법의 사용을 제안하였다.

본 연구에서 다중입출력 PPF 제어기의 구현을 위해 도입한 블록 단위의 역행렬 기법도 준역행렬 기법의 경우와 마찬가지로 제어력이 과잉되거나 아니면 감지가 과잉되는 결과를 가져온다[7,8]. 제어 과잉과 감지 과잉은 안정성과 밀접한 관련이 있다. 본 연구에서 이에 대해 좀더 이론적인 분석을 시도하여 제어기가 작용하는 경우의 시스템 성능과 특성을 예측할 수 있는 방법을 제시하였다. 이렇게 이론적

으로 그 성능이 예측 가능한 다중입출력 PPF 제어기를 앞에서 소개한 복합재 격자 구조물에 적용해 실험으로 그 타당성을 입증하였다.

## 2. 격자 구조물의 이론 모델링

앞에서 소개한 복합재 격자 구조물의 이론 모델링은 앞선 연구 결과[13]에 자세히 소개되어 있어 본 연구에서는 그 결과만을 간략하게 소개한다. 그림 1의 구조물에 대해 유한요소 모델링을 수행하면 다음과 같은 작동기 방정식과 감지기 방정식이 유도된다.

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

$$v_s = C_s x$$

여기서  $x$ 는  $m \times 1$ 의 노드 변위 벡터를 나타내며  $M, C, K$ 는 각각  $m \times m$ 의 질량, 감쇠, 강성 행렬을 나타낸다.  $m$ 은 유한요소 모델의 총 자유도이다.  $B_a$ 는  $m \times l$ 의 작동력 참여 행렬이고,  $C_s$ 는  $l \times m$ 의 감지 참여 행렬이다.  $l$ 은 작동기와 감지기의 개수를 나타낸다.

고유 진동수와 고유 모드는 고유치 문제를 풀어 얻을 수 있다[13]. 참고문헌 [13]에서 구한 처음 네 개의 모드 형상이 Fig. 2에 나타나 있다.

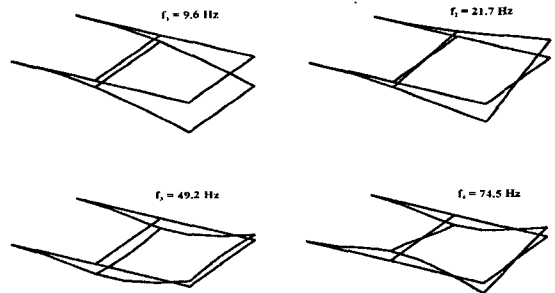


Fig.2 Natural Frequencies & Modes of the Grid Structure

Fig. 2에 보이는 바와 같이 복합재 격자 구조물은 중심축에 대해 대칭인 모드 인 굽힘 모드와 역대칭인 비틀림 모드로 이루어져 있다. 사실상, 첫 번째와 세 번째 모드는 굽힘 모드이며 두 번째와 네 번째 모드는 비틀림 모드이다. 이론 모델링의 결과는 실험 결과와 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다[13].

식 (1)로 주어진 방정식은 자유도가 커 제어기 설계에 적합하지 못하다. 따라서 다음과 같은 모달 변환을 이용해 자유도가 줄어든 시스템으로 변환하는 것이 바람직하다.

$$x = Uq \quad (2)$$

여기서  $q$ 는  $n \times 1$ 의 일반 변위 벡터이며  $U$ 는  $m \times n$ 의

고유 벡터 행렬이다.  $n$ 은 제어 대상 고유 모드만을 고려했을 경우의 개수이다. 고유 벡터의 직교성을 이용하면 다음과 같은 관계식, 즉,  $U^T M U = I$ ,  $U^T K U = \Lambda = \Omega^2$ 이 유도된다. 여기서  $I$ 는  $n \times n$  단위행렬이고  $\Omega$ 는  $n \times n$ 의 고유치 행렬이다. 또한  $U^T C U = 2Z\Omega$ 라고 가정하면 식(1)은 다음과 같은 형태로 변환된다.

$$\begin{aligned} \ddot{q} + 2Z\Omega\dot{q} + \Lambda q &= \bar{B}_a \nu_a \\ \nu_a &= \bar{C}_s q \end{aligned} \quad (3)$$

여기서  $Z$ 는  $n \times n$ 의 감쇠 인자 행렬이고,  $\bar{B}_a = U^T B_a$ ,  $\bar{C}_s = C_s U$ 이다.

식(3)으로부터 감지기와 작동기간의 전달함수가 유도될 수 있다. Fig. 3은 그 이론 결과를 본 연구에서 다시 수행한 실험 결과와 비교한 그림이다. 이론 계산에서 감쇠 인자는 모든 모드에 대해 0.005로 가정하였다.

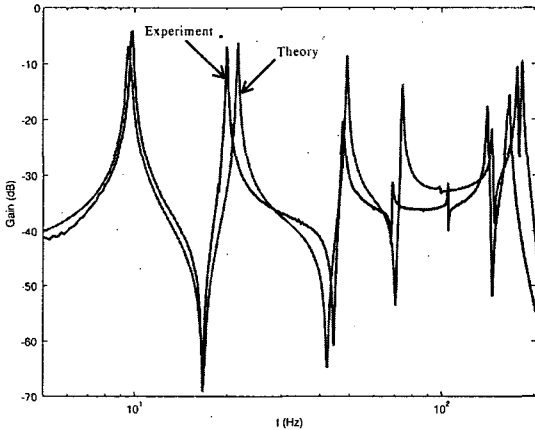


Fig.3 Theoretical and experimental Frequency Response Plots

본 연구에서는 두개의 작동기와 두개의 감지기를 이용해 네 개의 고유 모드를 제어하려고 한다. 네 개의 모드를 고려한 식(3)의 상수 행렬 수치값은 다음과 같다.

$$\Lambda = \text{diag}(3637.1, 18625.8, 95662.8, 219085.6)$$

$$2Z\Omega = \text{diag}(0.603, 1.365, 3.903, 4.681)$$

$$\bar{B}_a = \begin{bmatrix} -0.0033 & -0.0033 \\ 0.0063 & -0.0063 \\ -0.0175 & -0.0175 \\ -0.0250 & 0.0250 \end{bmatrix}$$

$$\bar{C}_s = \begin{bmatrix} -10693 & 15733 & -20881 & -18038 \\ -10693 & -15733 & -20881 & 18038 \end{bmatrix}$$

### 3. 다중입출력 PPF 제어기의 설계

하나의 입출력 PPF 제어기의 전달 함수는 다음과 같다[4].

$$H(s) = \frac{w_f^2}{s^2 + 2\zeta_f w_f s + w_f^2} \quad (4)$$

여기서  $w_f$ 와  $\zeta_f$ 는 PPF 보상회로의 필터 주파수와 감쇠 인자이다. 일반적으로 PPF제어기는  $w_f$ 를 대상 구조물의 고유진동수와 일치시킴으로써 능동 진동 제어를 이룩한다. 이 PPF 제어기를 일자유도 진동계에 적용할 경우 감쇠는 다음식과 같이 증가한다[8].

$$\zeta_c = \zeta + \frac{g}{4\zeta_f} \quad (5)$$

여기서  $\zeta$ 는 일자유도 진동계의 감쇠비이며  $g$ 는 이득이다.

식(3)이 의미하듯이 제어력은 모달 공간에 근거하여 계산된다. 이에 대응하는 다중입출력 모달 PPF 제어기는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\ddot{Q} + 2Z_f \Omega_f \dot{Q} + \Lambda_f Q = G^{\frac{1}{2}} \Lambda_f \hat{q} \quad (6)$$

여기서  $Q$ 는  $n \times 1$ 의 모달 PPF 벡터이며,  $Z_f$ 는  $n \times n$ 의 모달 PPF 제어기의 감쇠비 행렬이고,  $\Omega_f$ 는  $n \times n$ 의 모달 PPF 제어기의 필터주파수 행렬이다. 그리고  $G$ 는 이득행렬이다. 식(6)을 살펴보면  $Q$  벡터의 요소가 연성이 되어 있지 않음을 알 수 있다. 그러나 실제 제어력은 조합으로 이루어진다.  $\hat{q}$ 은 모달 변위의 평가값을 나타내는데 실제 감지기의 출력이 직접적으로 모달 변위로 연결되지 않기 때문에 도입되었다.

각각의 모달 공간에서 모달 PPF 제어력,  $Q$ 가 계산되었다고 가정하면, 그 다음 작업은 이 모달 제어력으로부터 실제의 제어력을 산출하는 문제이다. 방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\bar{B}_a \nu_a = G^{\frac{1}{2}} \Lambda Q \quad (7)$$

만일  $n = l$ 이라면 작동기의 개수가 제어 대상 모드 수와 동일하다는 것을 의미한다. 이 경우에  $\bar{B}_a$ 는 정사각형 행렬이 되고 특이하지 않는 경우 역행렬을 구할 수 있다. 따라서 식(7)로부터 쉽게 제어력을 산출할 수 있다. 그러나 만일  $n > l$ 이라면, 즉 작동기의 개수보다 제어 대상 모드의 수가 많은 경우에는 초과로 결정된 경우가 된다. 팍[15]은 이 경우에 대해 준행렬기법의 사용을 제안하였는데 이 방법을 사용하면 제어력이 다음식으로 계산된다.

$$\nu_a = (\bar{B}_a)^l G^{\frac{1}{2}} \Lambda Q \quad (8)$$

여기서  $(\bar{B}_a)^l = (\bar{B}_a^T \bar{B}_a)^{-1} \bar{B}_a^T$ 이다. 즉, 최소자승법에 의한 계산을 의미한다. 식(8)을 식(3)에 대입하면 다음과 같은

식이 유도된다.

$$\ddot{q} + 2Z\Omega\dot{q} + \Lambda q = \bar{B}_a (\bar{B}_a)^{-1} G^{\frac{1}{2}} \Lambda Q \quad (9)$$

이식이 모달 PPF 제어기 방정식 (6)과 한쪽을 이루기 위해서는  $\bar{B}_a (\bar{B}_a)^{-1}$ 가 적어도 대각선이 1인 단위 행렬에 가깝게 나타나는 것이 좋다. 그러나 앞에서 사용한 수치값을 사용해 계산해 보면 그 결과가 다음과 같다.

$$\bar{B}_a (\bar{B}_a)^{-1} = \begin{bmatrix} 0.035 & 0 & 0.183 & 0 \\ 0 & 0.059 & 0 & -0.236 \\ 0.183 & 0 & 0.905 & 0 \\ 0 & -0.236 & 0 & 0.941 \end{bmatrix} \quad (10)$$

식 (10)의 결과로부터 대각선 요소의 값이 1에 가깝지 않음을 알 수 있다. 특히, 첫 번째와 두 번째 대각선 요소는 너무 작은 값으로 나타나 다중입출력 PPF 제어기를 적용하는 경우에 예상하는 제어력을 발휘할 수 없게 된다.

본 연구에서는 이런 단점을 보완하기 위해 제어 대상 모드의 개수가 작동기 개수의 두 배가 되는 경우를 고려하였다. 이를 위해 역행렬이 가능한 블록 행렬을 구분하고 각각의 역행렬을 이용해 제어력을 산출하는 방법을 제시하고자 한다. 먼저 제어력 참여 행렬을 다음과 같이 구분한다.

$$\bar{B}_a = \begin{bmatrix} \bar{B}_{a1} \\ \bar{B}_{a2} \end{bmatrix} \quad (11)$$

여기서 각각의 블록행렬은 역행렬 계산이 가능하다고 가정하였다. 그리고 제어력 산출식을 다음과 같이 제안하였다.

$$\nu_a = B_a^* G^{\frac{1}{2}} \Lambda Q \quad (12)$$

여기서  $B_a^*$ 는 다음과 같이 각 블록행렬의 역행렬로 이루어져 있다.

$$B_a^* = [(\bar{B}_{a1})^{-1} \quad (\bar{B}_{a2})^{-1}] \quad (13)$$

이 경우에 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\ddot{q} + 2Z\Omega\dot{q} + \Lambda q = \hat{B} G^{\frac{1}{2}} \Lambda Q \quad (14)$$

여기서

$$\hat{B} = \bar{B}_a B_a^* = \begin{bmatrix} I & \bar{B}_{a1} (\bar{B}_{a2})^{-1} \\ \bar{B}_{a2} (\bar{B}_{a1})^{-1} & I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & \hat{B}_{12} \\ \hat{B}_{21} & I \end{bmatrix} \quad (15)$$

와 같은데 수치값을 대입하면 다음과 같은 결과가 나온다.

$$\hat{B} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0.190 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -0.250 \\ 5.277 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -3.995 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

이 행렬값을 식(10)의 값과 비교해보자. 먼저 (16)식의 대각선 행렬이 모두 1인 것을 알 수 있다. 따라서 예상되는 제어력을 그대로 유지하고 있음을 알 수 있다. 대각선 요소가 아닌 값들은 제어력이 다른 모드로 과잉 방출되고 있음을 의미한다. PPF 제어기는 잘 알려져 있다시피 필터주파수보

다 높은 주파수 대역의 고유진동모드에 영향을 주지 않는다. 반면에 자신의 필터주파수보다 낮은 영역에 있는 고유진동모드에 영향을 준다[8]. 따라서 (9)식과 (14)식의 제어력 산출 행렬의 위 삼각에 위치한 요소가 그 행의 대각선 행렬보다 작아야 한다. (10)식의 수치값과 (16)식의 수치값을 비교하면 (16)식의 수치값이 PPF 제어기에 적합함을 알 수 있다. 반면에 (10)식의 수치값은 적합하지 않음을 확인할 수 있다.

#### 4. 다중입출력 PPF 제어기의 과잉 제어문제

앞에서 설명한 바와 같이 PPF 제어기는 제어 대상 고유모드의 진동수 대역에 집중하여 감쇠를 증가시킬 수 있는 장점이 있다. PPF 제어기의 필터주파수보다 높은 주파수 대역의 고유진동모드에는 강성이 증가되는 효과를 주나 그 크기가 미미하여 아무런 영향을 주지 못한다. 그러나 PPF 제어기의 필터주파수보다 낮은 주파수 대역에 있는 고유진동모드에 강성의 저하를 가져와 고유진동수에 감소되는 현상이 나타난다. 특히 이득이 커지는 경우에는 정적 불안정을 야기할 수 있다. 이 현상이 실험적으로는 관측되었으나 이론적으로 설명된 적은 없었다. 본 연구에서는 이에 대해 좀더 자세히 다루고자 한다.

행렬로 표현된 운동방정식 (14)를 특정 고유진동 모드에 대해 다시 써보자.

$$\ddot{q}_r + 2\zeta_r w_r \dot{q}_r + w_r^2 q_r = \sum_{j=1}^n \hat{b}_{rj} g_j^{\frac{1}{2}} w_j^2 Q_j \\ = \sum_{j=1}^{r-1} \hat{b}_{rj} g_j^{\frac{1}{2}} w_j^2 Q_j + \hat{b}_{rr} g_r^{\frac{1}{2}} w_r^2 Q_r + \sum_{j=r+1}^n \hat{b}_{rj} g_j^{\frac{1}{2}} w_j^2 Q_j \quad (17)$$

식 (17)을 유도하는데 있어  $G = \text{diag}[g_1 \ g_2 \ \dots \ g_n]$ 이라고 가정하였다. 그리고  $\hat{b}_{ij}$ 는  $\hat{B}$ 행렬의 요소를 나타낸다. 한 개의 입출력을 가지는 PPF 제어기의 주파수 특성으로 인해 다음을 가정할 수 있다.

$$Q_j = \begin{cases} 0 & j < r \\ g_j^{\frac{1}{2}} \hat{c}_{jr} q_r & j > r \end{cases} \quad (18)$$

여기서  $\hat{c}_{jr}$ 은 감지기 행렬로부터 얻어지는 행렬의 요소이다. 식 (18)을 (17)에 대입하면 다음과 같이 운동방정식을 다시 쓸 수 있다.

$$\ddot{q}_r = 2\zeta_r w_r \dot{q}_r + (w_r^2 - \sum_{j=r+1}^n \hat{b}_{rj} g_j^{\frac{1}{2}} w_j^2 \hat{c}_{jr}) q_r \\ = \hat{b}_{rr} g_r^{\frac{1}{2}} w_r^2 Q_r \quad (19)$$

식 (19)로부터 특정 고유 모드에 맞추어진 PPF 제어기는 PPF 제어기의 필터 주파수보다 낮은 주파수 대역의 고유

진동모드에 대해 고유진동수가 낮아지게 만든다. 이런 진동수 천이 현상은 다중입출력 PPF 제어기를 설계하는데 있어 최고차 고유모드로부터 PPF 제어기의 필터 주파수를 맞추어오는 과정을 거쳐야 함을 의미한다. 본 연구에서 고려한 복합재 격자 구조물의 첫 번째와 세 번째 고유 진동모드는 굽힘 진동모드이며 두 번째와 네 번째 모드가 비틀림 진동모드이다. 다행히 굽힘 모드와 비틀림 모드는 서로 연성되어 있지 않음을  $\hat{B}$  행렬에서 관찰할 수 있다. 그래서 복합재 격자구조물의 경우에는 세 번째 굽힘 진동 모드에 대해 설계된 PPF 제어기가 첫 번째 굽힘 진동모드에 진동수 천이현상을 가져오며 네 번째 비틀림 진동모드에 대해 설계된 PPF 제어기가 두 번째 비틀림 진동모드에 진동수 천이 현상을 가져온다. 진동수 천이 현상을 확인하기 위해  $g_1 = g_2 = 0$ ,  $g_3 = 0.0549$ ,  $g_4 = 0.0362$ 로, 즉 세 번째와 네 번째 진동 모드를 제어할 경우 진동수 천이현상이 나타나는지 조사하였다. 근사식 (19)에 근거하여 진동수 천이를 계산한 결과 첫 번째 진동모드에 0.7Hz, 두 번째 진동모드에 1Hz의 진동수 천이가 일어남을 알 수 있었다. 정확한 계산에 의한 주파수 응답 곡선이 Fig. 4에 나타나있다. 그림에서 확인할 수 있듯이 근사식으로 예측한 진동수 천이 현상이 나타났다.

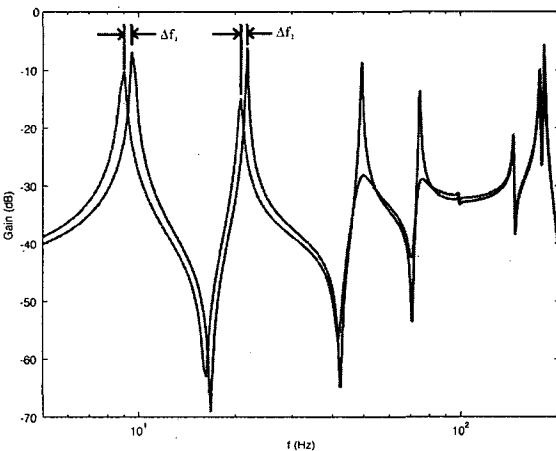


Fig. 4 The Frequency Shifts due to Control Spillover

여기서 PPF 제어기의 제어 효과 주파수 대역에 대해 설명하고자 한다. PPF 제어기가 효과를 보이는 주파수 대역은 PPF 제어기의 감쇠비와 밀접한 관련이 있다. 만일 작은 감쇠비를 사용한다면 식 (5)가 의미하듯이 높은 감쇠 증가 효과를 얻을 수 있다. 그러나 이 경우에 효과를 미치는 주파수 대역이 좁아지기 때문에 좀더 정확한 조정이 필요하다. 반대로 감쇠비를 크게 하면 효과를 줄 수 있는 주파수 대역은 넓어지지만 능동 감쇠 효과는 적어지게 된다. 일반적으로 0.3의 감쇠비가 사용되고 있다.

## 5. 다중입출력제어기의 적용

다중입출력제어기의 입력은 압전세라믹 감지기의 출력신호와 연결되어 있으며 다중입출력제어기의 출력은 압전세라믹 작동기와 연결되어 있다. 따라서 실제로 다중입출력 PPF 제어기를 적용하기 위해서는 감지기와 작동기를 연결하는 최종 제어식이 필요하다. 최종식은 다음과 같은 형태를 취하게 된다.

$$V_a(s) = B_a^* G^{\frac{1}{2}} \Lambda H_{ppf}(s) G^{\frac{1}{2}} C_s^* V_s(s) \quad (20)$$

여기서

$$H_{ppf}(s) = \begin{bmatrix} H_1(s) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & H_2(s) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & H_3(s) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & H_4(s) \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$H_i(s) = \frac{w_{fi}^2}{s^2 + 2\zeta_f w_{fi} s + w_{fi}^2}, i = 1, 2, 3, 4 \quad (22)$$

식 (20)으로 주어진 다중입출력 PPF 제어기를 적용하기 위해 각 PPF제어기의 감쇠비는 0.3으로 했으며 이득은  $G = \text{diag}(0.1, 0.045, 0.018, 0.012)$ 로 하여 이론 계산과 실험을 수행하였다. 이 이득값에 의해서는 진동수 천이 현상이 작게 나타나기 때문에 제어기 설계 과정에서 무시되었다. 이론 모델에 대해 제어를 하지 않은 경우와 다중입출력 제어기를 적용한 경우를 보여주는 것이 Fig. 5이다. 이 그림으로부터 네 개의 진동모드가 성공적으로 제어되었음을 알 수 있다.

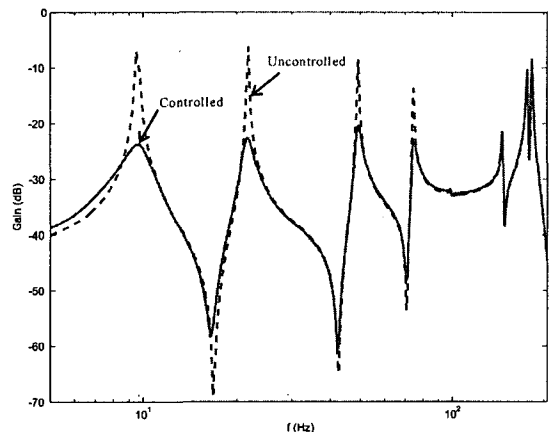


Fig. 6 Uncontrolled and Controlled Frequency Response Plots based on the Theoretical Model

식(20)으로 주어진 다중입출력제어기는 dSpace사의 DSP 보드, DS1102[16]와 Simulink[17]을 이용해 구현되었다. 식

(20)과 동등한 Simulink 블록선도의 디지털화된 코드가 DSP 보드로 다운로드하여 본 연구에서 제안한 다중입출력 PPF 제어를 수행하게 하였다. A/D와 D/A의 샘플링 속력은 50kHz인데 제어대상 네 개의 진동모드를 제어하는데 문제가 없는 속력이다. Fig. 8은 실험에 의해 얻어진 제어가 작용하지 않은 경우와 다중입출력 PPF 제어가 작용한 경우의 주파수 응답곡선을 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 이론으로 예측한 제어 성능이 그대로 실험에서 구현되고 있음을 알 수 있다. Fig. 9은 제어가 작용하지 않은 경우와 다중입출력 PPF 제어가 작용한 경우의 자유진동 응답 곡선을 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 구조물이 가진 후 약 1 초만에 진동이 억제되는 것을 볼 수 있다.

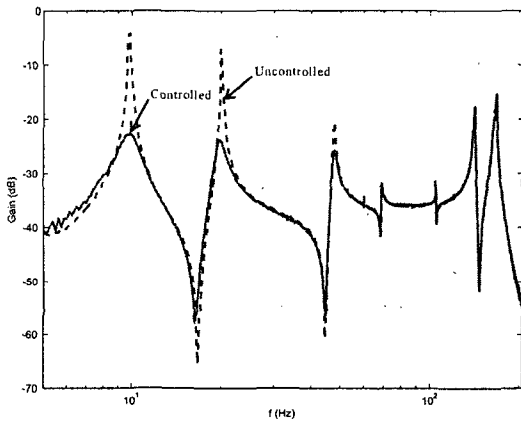


Fig.7 Uncontrolled and Controlled Frequency Response Plots from Experiments

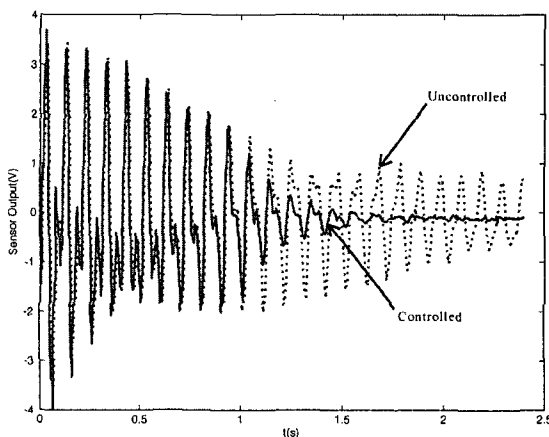


Fig. 8 Uncontrolled and Controlled Time Responses of Sensor Output

## 6. 토의 및 결론

본 연구에서는 블록 역행렬 기법에 근거한 새로운 다중입출력 PPF 제어기의 설계 방법을 소개하였다. 본 연구에서 제안한 다중입출력 제어기는 제어대상 진동모드 개수보다 작은 개수의 감지기와 작동기를 이용해 이를 제어하는 방법이다. 앞선 연구에서 준역행렬 기법을 이용해 이 문제를 해결하고자 하는 노력이 있었으나 제어력 저하가 일어나는 문제점이 발견되었다. 그러나 본 연구에서 새로 제안한 블록 역행렬 기법을 이용해 설계된 다중입출력 PPF 제어기의 경우에는 이런 현상이 나타나지 않았다.

구조물을 제어하는데 있어 제어 대상 진동모드의 개수와 동일한 수의 제어기와 감지기를 사용하면 제어 대상 모드를 제어하는데 어려움이 없다. 그러나 지능구조물의 자유도는 무한이고 감지기와 작동기의 개수는 제한되어 있기 때문에 제어의 과잉 현상이 발생한다. 본 연구에서는 제안한 다중입출력 PPF 제어기의 제어 과잉 현상을 이론적으로 설명하고, 과잉 현상으로 인해 발생하는 진동수 천이 현상의 예측 방법을 제시하였다. 수치계산 결과 블록 역행렬을 이용해 설계된 다중입출력 PPF 제어기는 준역행렬 기법을 이용해 설계된 다중입출력 PPF 제어기보다 과잉현상이 현저하게 적게 나타남이 확인되었다. 이는 본 연구에서 제안한 다중입출력 PPF 제어기의 우수성을 입증하는 것이라고 말할 수 있다.

마지막으로 본 연구에서 제안한 다중입출력 PPF 제어기의 실제 적용을 위한 방법을 소개하였으며, 이론 계산과 DSP 보드를 이용한 실험으로 그 성능을 입증하였다. 이론과 실험 결과에서 알 수 있듯이 본 연구에서 제안한 새로운 다중입출력 PPF 제어기가 지능구조물의 능동진동 제어에 효과적으로 사용될 수 있음이 입증되었다.

## 후 기

본 연구는 국방과학연구소가 지원하는 수중운동체 특화 연구센터의 수중/구조진동 연구실 지원으로 이루어졌다. 관계자 여러분께 감사드린다.

## 참 고 문 헌

- (1) Crawley, E.F. and de Luis, J., "Use of Piezoelectric Actuators as Elements of Intelligent Structures", AIAA Journal, Vol. 25, No. 10, 1987, pp. 1373-1385.
- (2) Crawley, E.F. and Anderson, E.H., "Detailed Models of Piezoceramic Actuation of Beams", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 1, No. 1, 1990, pp. 4-25.

- (3) Hanagud, S., Obal, M.W., and Calise, A.J., "Optimal Vibration Control by the Use of Piezoceramic Sensors and Actuators", *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 15, No. 5, 1992, pp. 1199-1206.
- (4) Fanson, J. L. and Caughey, T. T., "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., "Active Control of a Flexible Structure Using a Modal Positive Position Feedback Controller", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 1, 1990.
- (6) Meirovitch, L. and Baruh, H., "Control of Self-Adjoint Distributed-Parameter Systems", *Journal of Guidance and Control*, Vol. 5, 1982, pp. 60-66.
- (7) Friswell, M.I. and Inman, D.J., "The Relationship between Positive Position Feedback and Output Feedback Controllers", *Smart Materials and Structures*, Vol. 8, 1999, pp. 285-291.
- (8) 광문규, 한상보, 허석, "양변위 되먹임 제어기의 안정성, 제어 성능 및 설계 방법", *한국소음진동공학회 논문집*, 제 14권 제 3호, 2004, pp. 208-213
- (9) Denoyer, K.K. and Kwak, M.K., "Dynamic Modeling and Vibration Suppression of a Slewing Active Structure Utilizing Piezoceramic Sensors and Actuators", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 189, No. 1, Jan. 1996, pp. 13-31.
- (10) M. K. Kwak and D. Sciulli, "Fuzzy-Logic Based Vibration Suppression Control Experiments on Active Structures", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 191 No. 1, March 1996, pp. 15-28.
- (11) Hwang, W.-S., Park, H.C., and Hwang, W., "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, 1993, pp. 317-329.
- (12) 허석, 김기영, 광문규, "아날로그 회로와 마이크로 프로세서를 이용한 PPF 제어기의 구현", *한국소음진동공학회 논문집*, 제 14권 제 6호, 2004, pp. 455-462.
- (13) 라완규, 광문규, 윤광준, "압전감지기와 작동기를 이용한 복합재료 격자 구조물의 능동진동제어", *한국항공우주학회지*, 제 25권, 제 5호, 1997, pp. 76-85.
- (14) 광문규, 라완규, 윤광준, "PPF 와 SRF 혼합제어 기법을 이용한 복합재료 격자 구조물의 능동진동제어", *한국소음진동공학회지*, 제 7권, 제 5호, 1997, pp. 811-817.
- (15) 광문규, "지능구조물의 능동진동제어를 위한 PPF 제어기와 수정 LQG 제어기의 비교 연구", *한국소음진동공학회지*, 제 8권, 제 6호, 1998년, pp. 1121-1129.
- (16) <http://www.dspaceinc.com>
- (17) <http://www.mathworks.com>