

〈논 문〉

PSOF 방법을 이용한 압전 지능 구조물의 능동 및 반능동 진동제어

Active and Semi-Active Vibration Control of Piezoelectric Smart Structures Using a Pseudo-Sensor-Output-Feedback Method

김 영 식* · 김 영 태** · 오 동 영***
Yeung-Shik Kim, Young-Tae Kim and Dong-Young Oh**

(1998년 8월 17일 접수 : 1999년 1월 8일 심사완료)

Key Words : Pseudo-Sensor-Output-Feedback(가상 감지기 출력 되먹임), Sliding Mode Control (슬라이딩 모드 제어), Piezoelectric Smart Structures(압전 지능 구조물)

ABSTRACT

This paper presents a pseudo-sensor-output-feedback(PSOF) method for the vibration suppression of the flexible piezoelectric smart structures. This method reduces the modeling errors using pseudo sensors in the output equation formulation. It also reduces computation time in practice, since the output equation does not need the state observer required in the state space equation. Experimental works are performed for the validation of theoretical predictions with the piezoelectric sensor and actuator bonded on the cantilever beam. An algorithm based on the sliding mode control theory is developed and analyzed for the robustness to the modeling errors and parameter uncertainties. This study also discusses the characteristics of the active and semi-active systems.

1. 서 론

지금까지 유연 구조물들의 진동제어에 대하여 많은 사람들에 의해 연구되어져 왔으며 또한 많은 발전을 이루었다. 유연 구조물의 진동을 감쇠하기 위한 제어기술은 수동, 능동 및 반능동시스템으로 구분할 수 있다⁽¹⁾. 수동시스템은 구조물의 변수들이 고정되어 있어 시스템변화에 능동적으로 대처할 수

없는 단점이 있으며, 능동시스템은 환경변화에 능동적으로 대처할 수 있다는 잇점이 있으나 유연 구조물에 적용할 경우 관측오차에 의해 시스템을 불안정하게 할 요소가 있다. 반면 반능동시스템은 항상 시스템의 에너지를 소멸하므로 안정하며 구조가 간단하다는 이점이 있으나 작동기의 제약조건으로 인하여 능동시스템보다 성능이 다소 미흡하다는 점이 있다. 유연 구조물의 진동을 제어하기 위한 시스템의 모델은 상태공간방정식 또는 출력방정식에^(2~4) 의해 표현될 수 있다. 이 때 유연 구조물은 무한차수로 모델되며 실시간 제어를 위하여 유한차수로 모델하는 과정에서 모델오차가 필수적으로 수반된다. 상태공간방정식으로부터 제어입력을 결정할 경우에는 모

* 정회원, 금오공과대학교 기계공학부

** 금오공과대학교 기계공학부

*** 탐 엔지니어링

든 상태변수의 값들을 알아야 하며, 이 값들은 관측기를 통하여 얻을 수 있다. 이 때 복잡한 구조물인 경우 모델오차에 의해 관측오차가 수반되며 이 오차로 인하여 관측스필오버(Observation Spillover)를 야기하게 된다⁽⁵⁾. 그러나 출력방정식에 의한 출력변수 피드백은 감지기로부터 측정된 변수의 값을 바로 사용하게 되므로 관측기가 필요 없어 제어가 간단하고 실시간 제어시 계산시간을 단축할 수 있어 실제 구조물에 적용하기가 편리하다는 이점이 있다.

본 논문에서는 반능동시스템에 대하여 유연 구조물의 진동을 감쇠하기 위하여 개발된 PSOF (Pseudo-Sensor-Output-Feedback)⁽⁶⁾ 제어이론을 실험을 통하여 입증하고자 하며, 또한 이 이론을 능동시스템에 적용하여 타당성을 검증하고, 능동과 반능동시스템의 결과들을 비교 분석하고자 한다. PSOF의 경우 시스템 정확한 시스템 모델을 얻기 위하여 특이점(ncdal point)을 제외한 일정수의 가상감지기를 설치하여 그 지점의 정보를 얻음으로써 시스템 모델의 오차를 최소화 할 수 있다. 따라서 구조물에 대한 감지기 개수의 제한에 따른 모델오차를 줄임으로써 효과적인 진동제어를 할 수 있다는 특징이 있다. 한편 가상감지기에 의한 시스템 불확실성은 출력방정식으로부터의 모델오차, 시스템 불확실성 및 외란으로서 이에 강건한 슬라이딩 모드 제어이론을 적용하여 해결하였다.

실험에 사용된 작동기와 감지기로는 압전 재료를 사용하였으며 최근 압전지능구조물의 진동 제어를 위한 연구가 많이 수행되고 있다⁽⁷⁾. 이 재료의 특징은 첫째로 재료에 변형을 가하였을 경우 변형 량에 비례하는 전압이 발생하며, 역으로 전압이 가해지면 재료의 변형을 유발하게 된다는 것이다. 둘째로 구조물과 우수한 상호 접착성을 가지고 있어 유연 구조물이 진동특성을 용이하게 감지할 수 있다는 것이다. 이러한 특성들을 이용하여 유연 구조물의 진동을 감쇠하기 위한 감지기와 작동기로 압전 재료를 각각 사용하였다. 본 논문에서는 작동기의 모우멘트를 이용하여 능동시스템을 구성할 수 있었고, 반면 감지기와 작동기를 같은 위치에 있게 하여 제어위치에서 정확한 출력을 감지할 수 있게 함으로써 가변뎀핑계수를 이용한 반능동시스템을 구성할 수 있었다.

2. PSOF 방정식

구조물은 연속체로써 무한의 자유도로써 시스템을 표현할 수 있다. 주파수 영역에서 여러 모드가 밀집

되어 있는 유연 구조물은 특히 모델오차에 대하여 민감하다. 따라서, 본 논문에서는 이 문제점을 보완할 수 있는 PSOF 제어방법을 적용하기 위하여 출력방정식을 능동 및 반능동시스템에 대하여 각각 세우고자 한다.

구조물의 변위 $w(x, t)$ 와 속도 $\dot{w}(x, t)$ 를 이산화과정으로부터 다음과 같은 형태로 가정한다.

$$\begin{aligned} w(x, t) &= \sum_{i=1}^{N_m} \phi_i(x) y_i(t) \\ \dot{w}(x, t) &= \sum_{i=1}^{N_m} \phi_i(x) \dot{y}_i(t) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, N_m 은 모델차수, $\phi_i(x)$ 는 위치의존 함수, x 는 공간좌표, $y_i(x)$ 와 $\dot{y}_i(x, t)$ 는 i 번째 일반 변위와 속도이다.

2.1 능동 시스템

능동 제어시스템의 운동방정식을 이산화 모델로 표현하면 다음과 같다.

$$\ddot{\mathbf{y}}(t) + [\Omega] \mathbf{y}(t) = B \mathbf{u}(t) \quad (2)$$

여기서, $\mathbf{y}(t)$ 는 $N_m \times 1$ 일반변위벡터, $[\Omega]$ 는 $N_m \times N_m$ 대각행렬, B 는 $N_m \times N_C$ 행렬, 제어입력 $\mathbf{u}(t)$ 는 $N_C \times 1$ 행렬이다. 여기서 N_m 은 제어 모드 갯수 N_C 와 잔여 모드 갯수 N_R 의 합이다. 식 (2)을 제어 모드와 잔여 모드로 분리하여 나타내면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{y}}_C(t) \\ \ddot{\mathbf{y}}_R(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Omega_C & 0 \\ 0 & \Omega_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{y}_C(t) \\ \mathbf{y}_R(t) \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} B_C \\ B_R \end{bmatrix} \mathbf{u}(t) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 $\mathbf{y}_C(t)$ 와 $\mathbf{y}_R(t)$ 는 $N_C \times 1$ 과 $N_R \times 1$ 일반 변위벡터이다. Ω_C 와 Ω_R 은 $N_C \times N_C$ 와 $N_R \times N_R$ 대각행렬이고, B_C 와 B_R 은 $N_C \times N_C$ 와

$N_R \times N_C$ 제어력의 위치관련 행렬이다. 가상 감지기를 도입하여 구조물의 변위와 속도 벡터를 표시하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mathbf{w}_p(t) &= \begin{bmatrix} \mathbf{w}_C(t) \\ \mathbf{w}_R(t) \end{bmatrix} = S \begin{bmatrix} \mathbf{y}_C(t) \\ \mathbf{y}_R(t) \end{bmatrix} = S \mathbf{y}(t) \\ \dot{\mathbf{w}}_p(t) &= \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{w}}_C(t) \\ \dot{\mathbf{w}}_R(t) \end{bmatrix} = S \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{y}}_C(t) \\ \dot{\mathbf{y}}_R(t) \end{bmatrix} = S \dot{\mathbf{y}}(t) \end{aligned} \quad (4)$$

$$S = \begin{bmatrix} S_{CC} & S_{CR} \\ S_{RC} & S_{RR} \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서, $w_c(t)$ 와 $\dot{w}_c(t)$ 는 제어점의 $N_C \times 1$ 출력변위와 속도벡터들이고, $w_R(t)$ 와 $\dot{w}_R(t)$ 는 가상 감지점에서의 $N_R \times 1$ 출력 변위와 속도 벡터들이다. S 는 $N_m \times N_m$ 감지기 위치에 관련된 행렬이고, S 의 소행렬들인 S_{RC} 와 S_{RR} 는 $N_R \times N_C$ 와 $N_R \times N_R$ 행렬이다. 식 (3)과 식 (4)로부터 제어 모드와 잔여 모드를 고려한 출력방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{w}_p(t) &= S \bar{y}(t) = S[-\Omega y(t) + B u(t)] \\ &= S[-\Omega S^{-1} w_p(t) + B u(t)] \end{aligned} \quad (6-a)$$

제어점과 가상 감지점을 분리하여 나타낸 출력방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \bar{w}_c(t) \\ \bar{w}_R(t) \end{bmatrix} + [S\Omega S^{-1}] \begin{bmatrix} w_c(t) \\ w_R(t) \end{bmatrix} \\ = [SB] u(t) \end{aligned} \quad (6-b)$$

여기서,

$$\begin{aligned} [S\Omega S^{-1}] &= \begin{bmatrix} (S\Omega S^{-1})_{CC} & (S\Omega S^{-1})_{CR} \\ (S\Omega S^{-1})_{RC} & (S\Omega S^{-1})_{RR} \end{bmatrix} \\ [SB] &= \begin{bmatrix} (SB)_c \\ (SB)_R \end{bmatrix} \end{aligned}$$

한편, 가상 감지기의 위치는 S 의 역행렬이 특이점이 되지 않도록 주의 깊게 선정되어야 하겠다. 제어점에 관한 출력방정식은 식 (6)으로부터 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{w}_c(t) + (S\Omega S^{-1})_{CC} w_c(t) \\ = -(S\Omega S^{-1})_{CR} w_R(t) + (SB)_c u(t) \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)과 같이 출력 방정식으로 모델링하는 과정에서 제어 모드와 잔여 모드를 함께 고려되었으므로 모델오차를 줄일 수 있으며, 이식은 제어를 설계하는데 사용된다.

2.2 반능동 시스템

일반적인 반능동 제어시스템의 운동방정식을 이산화 모델로 표현을 하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\bar{y}(t) + [C(u, t)] \dot{y}(t) + [\Omega] y(t) = 0 \quad (8)$$

72/한국소음진동공학회지/제 9 권 제 1 호, 1999년

여기서, $[C(u, t)]$ 는 $N_m \times N_m$ 감쇠 행렬이다.

식 (8)을 제어 모드와 잔여 모드로 분리하여 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \bar{y}_c(t) \\ \bar{y}_R(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{CC} & C_{CR} \\ C_{RC} & C_{RR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{y}_c(t) \\ \dot{y}_R(t) \end{bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} \Omega_c & 0 \\ 0 & \Omega_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_c(t) \\ y_R(t) \end{bmatrix} = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 C_{CC} , C_{CR} , C_{RC} , C_{RR} 은 $N_C \times N_C$, $N_C \times N_R$, $N_R \times N_C$, $N_R \times N_R$ 가변 감쇠 행렬이다.

식 (4)와 같이 가상 감지기를 도입하여 출력방정식으로 표현하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \bar{w}_p(t) &= S \bar{y}(t) = S[-C \dot{y}(t) - \Omega y(t)] \\ &= S[-C S^{-1} \dot{w}_p(t) - \Omega S^{-1} w_p(t)] \end{aligned} \quad (10-a)$$

제어점과 가상 감지점을 분리하여 나타낸 출력방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \bar{w}_c(t) \\ \bar{w}_R(t) \end{bmatrix} + [SC S^{-1}] \begin{bmatrix} \dot{w}_c(t) \\ \dot{w}_R(t) \end{bmatrix} \\ + [S\Omega S^{-1}] \begin{bmatrix} w_c(t) \\ w_R(t) \end{bmatrix} = 0 \end{aligned} \quad (10-b)$$

여기서,

$$\begin{aligned} [SC S^{-1}] &= \begin{bmatrix} (SC S^{-1})_{CC} & (SC S^{-1})_{CR} \\ (SC S^{-1})_{RC} & (SC S^{-1})_{RR} \end{bmatrix} \\ [S\Omega S^{-1}] &= \begin{bmatrix} (S\Omega S^{-1})_{CC} & (S\Omega S^{-1})_{CR} \\ (S\Omega S^{-1})_{RC} & (S\Omega S^{-1})_{RR} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

식 (10)에서 제어점에 관한 출력방정식은 다음과 같이 쓸 수 있으며, 이식은 제어기 설계시 사용된다.

$$\begin{aligned} \bar{w}_c(t) + (SC S^{-1})_{CC} \dot{w}_c(t) + (S\Omega S^{-1})_{CC} w_c(t) \\ = -(SC S^{-1})_{CR} \dot{w}_R(t) - (S\Omega S^{-1})_{CR} w_R(t) \end{aligned} \quad (11)$$

3. 제어기 설계

제어입력 $u(t)$ 을 정의하는 방법에는 여러 가지가 있으나, 본 논문에서는 모델오차, 시스템의 불확실성, 및 외란에 대하여 강건한 슬라이딩 모드 제어 기법⁽⁸⁾을 사용하였다. 제어입력을 구하기 위하여 슬라이딩 평면 $s(t)$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$s(t) = \dot{w}_c(t) + [\lambda] w_c(t) \quad (12)$$

여기서 s 는 $N_c \times 1$ 벡터이고, $[\lambda]$ 는 $N_c \times N_c$ 대각행렬이며 슬라이딩 평면의 기울기를 나타내는 양의 수이다. 임의의 오차 공간상의 점을 슬라이딩 평면에 보낼 수 있다면 양의 $[\lambda]$ 값에 의해 추적오차는 점근적으로 영에 접근하게 된다. 이는 다음과 같은 슬라이딩 모드 존재 조건을 만족해야 얻을 수 있다.

$$s_i \dot{s}_i \leq -\eta_i |s_i|, i=1, \dots, N_c \quad (13)$$

여기서 η_i 는 작은 양의 수이다. $s_i = |s_i| \text{sgn}(s_i)$ 를 이용하여 식 (13)을 다시 쓰면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} s_i |\text{sgn}(s_i)| \dot{s}_i &= -\eta_i |s_i| \\ \dot{s}_i &= -\eta_i \text{sgn}(s_i) \end{aligned} \quad (14)$$

여기서 $\text{sgn}(s_i)$ 함수는 다음과 같이 정의된다.

$$\text{sgn}(s_i) = \begin{cases} 1 & s_i > 0 \\ -1 & s_i < 0 \end{cases} \quad (15)$$

슬라이딩 표면에서 $\text{sgn}(s_i)$ 함수로 인한 시스템의 떨림 현상을 제거하기 위하여 Slotine에⁽⁹⁾ 의해 경계층 (δ)이 도입되었으며, 급격하게 변하는 $\text{sgn}(s_i)$ 함수는 경계층 안에서 완만하게 변하는 $\text{sat}(s_i/\delta_i)$ 함수로 치환되며 이 함수는 다음과 같이 정의된다.

$$\text{sat}(s_i/\delta_i) = \begin{cases} 1 & s_i/\delta_i \geq 1 \\ -1 & s_i/\delta_i \leq -1 \\ s_i/\delta_i & -1 \leq s_i/\delta_i \leq 1 \end{cases} \quad (16)$$

3. 능동 시스템

능동시스템의 출력 방정식은 식 (7)과 같으며 이 식으로부터 제어입력을 계산하기 위하여 오른쪽 첫 번째 항은 시스템의 불확실성으로 취급하며 이 불확실성의 최대 값은 a 라 한다. 식 (12)을 미분하여 식 (14)에 대입하고, 식 (16)을 이용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{s}(t) &= \dot{\bar{w}}_c(t) + [\lambda] \dot{w}_c(t) \\ &= -(S\Omega S^{-1})_{cc} w_c(t) \\ &\quad + (SB)_c u(t) + [\lambda] \dot{w}_c(t) \\ &= -[\eta + a]k(s) \end{aligned} \quad (17)$$

여기서, $[\eta + a]$ 는 $N_c \times N_c$ 대각행렬이며,

$$k(s) = \begin{bmatrix} \text{sat}(s_1/\delta_1) \\ \vdots \\ \text{sat}(s_{N_c}/\delta_{N_c}) \end{bmatrix} \quad \text{이다.}$$

식 (17)로부터 제어입력을 구하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} u(t) &= (SB)_c^{-1} [(S\Omega S^{-1})_{cc} w_c(t) \\ &\quad - [\lambda] \dot{w}_c(t) - [\eta + a]k(s)] \end{aligned} \quad (18)$$

3.2 반능동 시스템

일반적인 반능동시스템의 출력 방정식은 식 (11)과 같으나 능동시스템의 출력 방정식인 식 (7)으로부터 반능동 시스템의 출력 방정식으로 변환하면 다음 식과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\bar{w}}_c(t) + [C(t)]_{cc} \dot{w}_c(t) \\ + (S\Omega S^{-1})_{cc} w_c(t) \\ = -(S\Omega S^{-1})_{cr} w_r(t) \end{aligned} \quad (19)$$

여기서 가변 댐핑행렬 $[C(t)]_{cc}$ 는 $N_c \times N_c$ 대각행렬이며 양의 정수라면 식 (19)은 항상 안정하다⁽¹¹⁾. 식 (19)에서 $[C(t)]_{cc}$ 는 대각행렬이므로 압전 재료에서 발생하는 힘과의 관계는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$[C(t)]_{cc} \dot{w}_c(t) = [\dot{w}_c(t)]_{cc} C(t) = -(SB)_c u(t) \quad (20)$$

여기서 $[\dot{w}_c(t)]_{cc}$ 는 $N_c \times N_c$ 대각행렬이며 $C(t)$ 는 $N_c \times 1$ 벡터이다. 제어입력을 계산하기 위하여 식 (19)의 오른쪽 항은 시스템의 불확실성으로 취급하며 이 불확실성의 최대 값은 양의 수 β 라 한다. 식 (12)를 미분하여 식 (14)에 대입하고, 식 (16)을 이용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{s}(t) &= \dot{\bar{w}}_c(t) + [\lambda] \dot{w}_c(t) \\ &= [\dot{w}_c(t)]_{cc} C(t) - (S\Omega S^{-1})_{cc} w_c(t) \\ &\quad + [\lambda] \dot{w}_c(t) \\ &= -[\eta + \beta]k(s) \end{aligned} \quad (21)$$

식 (21)으로부터 반능동시스템에서의 제어입력 $C(t)$ 을 구하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} C(t) &= [\dot{w}_c(t)]_{cc}^{-1} [(S\Omega S^{-1})_{cc} w_c(t) \\ &\quad - [\lambda] \dot{w}_c(t) - [\eta + \beta]k(s)] \end{aligned} \quad (22)$$

한편 식 (22)에서 계산된 감쇠값이 음일 경우 그

값을 영으로 하였으며, 실제의 제어입력 $u(t)$ 는 식 (20)에 의하여 다음식과 같이 표현할 수 있다.

$$u(t) = -(SB)^{-1} [\dot{w}_c(t)]_{cc} C(t) \quad (23)$$

4. 실험 결과

제안된 알고리즘의 제어 성능을 입증하기 위하여 Fig. 1에서 보여주는 바와 같이 한쪽 단이 지지된 Euler-Bernoulli빔을 모델로 선택하였다. PZT 및 빔에 대한 매개변수들은 Table 1에 나타내었다. 실험의 진행과정을 단계별로 나누면 첫 번째 단계는 빔의 표면에 부착된 압전 감지기로부터 빔의 진동특성을 획득하고 이를 A/D변환기(Lab-Pc+)를 통하여 컴퓨터에 보내진다. 두 번째 단계는 컴퓨터를 이용하여 제어프로그램을 만든 후 획득한 데이터들이 제어기를 거침으로써 원하는 제어입력을 얻게 된다. 세 번째 단계는 이러한 제어 값을 D/A변환기(Lab-Pc+)와 직류전압 증폭기(DC7520)를 통하여 빔의 표면에 부착된 압전 작동기에 공급함으로써 바

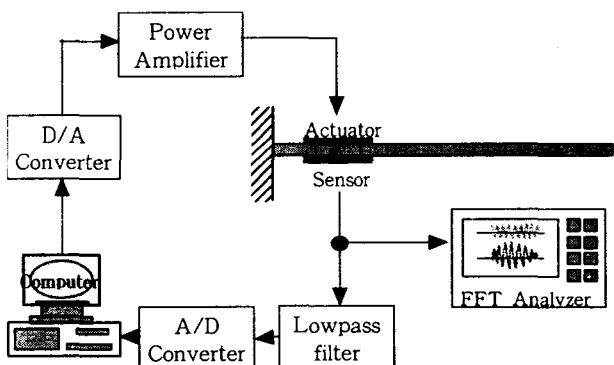


Fig. 1 Schedule diagram of experimental apparatus

람직하지 않은 진동을 제어하게 된다.

Fig. 2에서 보여주는 바와 같이 감지기는 1개의 실제 감지기와 4개의 가상 감지기로 구성하였다. 실제 감지기와 작동기는 모든 모드의 특성을 잘 파악할 수 있는 곳에 상하로 같은 위치에 놓았으며 그 위치는 지지 점으로부터 0.3(mm)이다. 가상 감지기

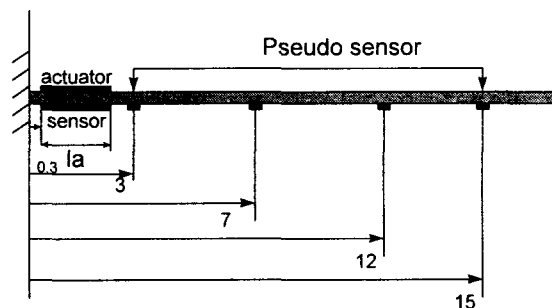


Fig. 2 Position of the real sensor and the pseudo sensors

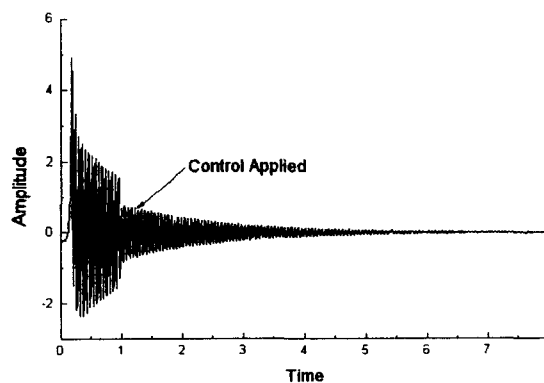


Fig. 3 Reponse of the cantilever beam with the active control

Table 1 Parameters of the BEAM and PZT

BEAM		PZT	
Young's modulus (E)	$2.05 \times 10^{11} [N/m^2]$	Young's modulus (E_p)	$6.3 \times 10^{10} [N/m^2]$
Thickness (h)	$0.762 \times 10^{-4} [m]$	Thickness (h_p)	$0.762 \times 10^{-4} [m]$
Width (b)	$1.4 \times 10^{-2} [m]$	Width (b_p)	$1.4 \times 10^{-2} [m]$
Length (L)	$0.18 [m]$	Length (L_p)	$2.54 \times 10^{-2} [m]$
Moment of inertia (I)	$0.52 \times 10^{-10} [m^4]$	PZT constant (d_{31})	$-166 \times 10^{-12} [m/V]$

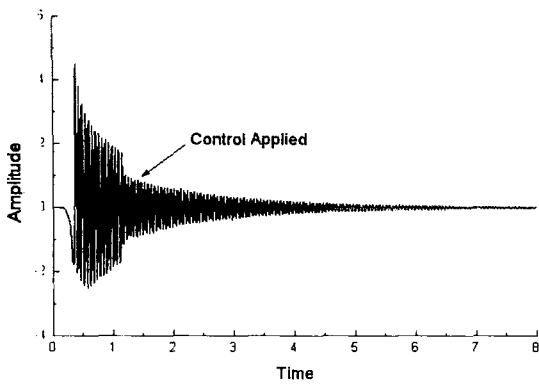


Fig. 4 Reponse of the cantilever beam with the semi-active control

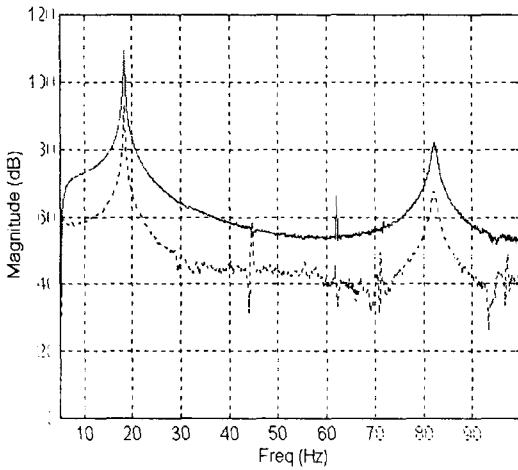


Fig. 5 Frequency reponse of the cantilever beam with the semi-active control

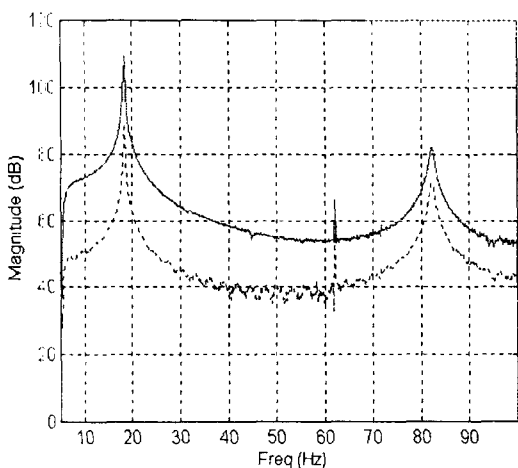


Fig. 6 Frequency reponse of the cantilever beam with the active control

의 위치는 모드시험을 통해 구해진 특이점을 제외함 부분에 각 모드의 특성을 알 수 있는 곳에 부착하였으며 그 위치는 각각 3, 7, 12, 15(cm)이다.

Fig. 3과 Fig. 4는 시간에 따른 시스템의 진동 감쇠 현상을 능동과 반능동시스템에 대하여 나타내었다. Fig. 5와 Fig. 6은 FFT 분석기(HP3563A)에 입력된 가진력과 응답 변위가 신호 처리되어 주파수 응답함수로 변환된 것을 나타내었다. 이들 실험에 사용된 변수들의 값은 $\alpha=7$, $\beta=5$, $\gamma=50$, $\delta=0.001$ 이며 sampling rate는 500 Hz이다. 그림에서 보는 바와 같이 능동 시스템의 경우 10 dB정도의 진동 저감 효과가 나타나고 반능동시스템의 경우 8 dB정도의 진동 저감 효과가 나타났다. 여기서 반능동시스템의 경우 관측기 오차에 관계없이 계속해서 에너지를 소멸하므로 능동 시스템보다 안정하나 성능이 다소 떨어짐을 알 수 있다. 능동 시스템의 경우는 관측기 오차에 의해 나타나는 스펙오버 현상 때문에 시스템 안정성에서는 반능동시스템보다 떨어지나 제어 속도 즉 제어 성능 면에서는 반능동시스템보다 좋음을 알 수 있다. 따라서 능동시스템의 경우 관측기 오차의 영향을 거의 받지 않는 아주 큰 구조물 등에서 좋은 성능을 발휘하고 반능동시스템의 경우는 제어시스템의 안정성이 요구되는 경우와 관측오차를 유발가능성이 높은 모드가 밀집된 구조물에 적합하다.

5. 결 론

모델 오차를 최소화하고 출력변수 되먹임방법의 장점을 이용하여 반능동시스템에 대하여 개발된 PSOF 제어방법을 실험을 통해 검증함으로써 그 이론적 타당성을 입증하였고, 또한 능동시스템에 대하여 이론해석 및 실험을 통하여 그 적용 가능성을 입증하였다. 또한, 구조물 모델시 가상감지기를 사용함으로써 감지기의 수의 제한에 따른 모델 오차를 줄여 효과적으로 진동이 제어됨을 알 수 있었으며, 능동 제어기법과 반능동 제어기법을 비교 분석함으로써 각 제어기법에 따른 장단점을 파악하여 시스템 특성을 고려한 효과적인 제어기법을 제안하였다.

후 기

이 논문은 1997년도 금오공과대학교의 중점연구 과제 연구비에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- (1) Kim, Y. S. and Wang, K. W., 1993, "On the Sliding Mode Control of Structural Vibrations via Variable Damping," *Mechanical Systems and signal Processing*, Vol. 7, pp. 335~347.
- (2) Canavin, J. R., 1978, "The Control of Spacecraft Vibration Using Multivariable Output Feedback," Paper 78-1419, AIAA/AASA Astrodynamics Conference, Palo Alto, CA..
- (3) Heck, B. S. and Ferri, A. A., 1989, "Application of Output Feedback to Variable Structure Systems." *J. of Guidance*, Vol. 12, No. 6, pp. 932~935.
- (4) Yurkovich, S., Ozguner, U. and Al-Abbass, F., July-September 1988, "Model Reference, Sliding Mode Adaptive Control for Flexible Structures," *J. of the Astronautical Sciences*, Vol. 36, No. 3, pp. 285~310.
- (5) Meirovitch, L. and Baruh, H., 1981, "On the Problem of Observation Spillover in Distributed Parameter Systems," *Dynamics and Control of Large Flexible Spacecraft Proceedings of the Second VPI & SU/AIAA Symposium*, pp. 319~341.
- (6) KIM, Y. S. and Wang, K. W., July 1995, "A Pseudo-Sensor-Output-Feedback Approach for Semi-Active Structural Control," *ASME, J. of Vibration and Acoustics*, Vol. 117, pp. 381~384.
- (7) 신 호철, 최 승복, 1996, "압전 작동기를 이용한 매우 유연한 로봇 팔의 진동 제어," *한국소음진동 공학회지*, 제 6 권, 제 2 호, pp. 187~196.
- (8) Utkin, V. I., 1991, "Variable Structure Systems with Sliding Modes," *IEEE Transaction Automatic Control*, Vol AC-22, No. 2, pp. 421~430.
- (9) Slotine, J. E., 1984, "Sliding Controller Design for Non-linear System," *Int. J. Control*, Vol. 40, No. 2, pp. 421~432.
- (10) Balas, M. J., May-June 1979, "Direct Velocity Feedback Control of Large Space Structures," *J. of Guidance and Control*, Vol. 2, pp. 252~253.