

< 논 문 >

## 이산시간 퍼지-슬라이딩모드를 이용한 스마트구조물의 강건진동제어

최승복\* · 김명석\*\*

(1996년 6월 27일 접수)

### Robust Vibration Control of Smart Structures via Discrete-Time Fuzzy-Sliding Modes

Seung-Bok Choi and Myoung-Suk Kim

**Key Words :** Smart Sturcture(스마트구조물), Robust Vibration Control(강건진동제어), Piezofilm Actuator(압전필름작동기), Discrete-Time Fuzzy-Sliding Mode Control(이산시간 퍼지-슬라이딩모드제어)

#### Abstract

This paper presents a new discrete-time fuzzy-sliding mode controller for robust vibration control of a smart structure featuring a piezofilm actuator. A governing equation of motion for the smart beam structure is derived and a discrete-time model with mismatched uncertainties such as parameter variations is constructed in a state space. A discrete-time sliding mode control system consisting of an equivalent controller and a discontinuous controller is formulated. In the design of the equivalent part, so called an equivalent controller separation method is adopted to achieve faster convergence to a sliding surface without extension of a sliding region, in which the system robustness may not be guaranteed. On the other hand, the discontinuous part is constructed on the basis of both the sliding and the convergence conditions using a time-varying feedback gain. The sliding mode controller is then incorporated with a fuzzy technique to appropriately determine principal control parameters such as a discontinuous feedback gain. Experimental implementation on the forced and random vibration controls is undertaken in order to demonstrate superior control performance of the proposed controller.

#### 1. 서 론

최근 컴퓨터 등 첨단 기술의 발달은 재료의 발달과 더불어 로봇, 우주구조물 등의 경량화와 소형화의 구현을 가능하게 하였다. 그러나 구조물 자체의 경량화로 인한 진동문제가 반드시 수반된다. 진

동제어에 관한 연구의 일환으로 전기유동유체(electro-rheological fluid), 형상기억합금(shape memory alloy), 압전재료(piezoelectric material) 그리고 광섬유(optical fiber) 등을 이용하는 스마트구조물(smart structure)에 대한 연구가 최근 활발히 진행되고 있다.<sup>(1,2)</sup>

그런데, 가볍고 작은 스마트구조물에는 필연적으로 시스템 변수변동(parameter variation) 및 외란(disturbance)이 존재하게 되어 기존의 PID 제어기

\*회원, 인하대학교 기계공학과

\*\*회원, 두원정공(주) 기술연구소

와 같은 재래식 제어 시스템보다는 제어 대상 시스템의 변수변동 및 외란에 강건한  $H_\infty$  및 슬라이딩 모드제어(sliding mode control; SMC)와 같은 제어 알고리즘이 요구된다.<sup>(4)</sup> 슬라이딩모드는 가변구조 시스템(variable structure system; VSS)의 주요 작동모드로서 알맞는 불연속 제어입력을 사용하여 얻을 수 있다. 슬라이딩모드에서는 전체 상태공간간의 차수보다 낮은 차수를 갖는 초평면들에 상태 궤적이 속하게 되며, 이 때 슬라이딩운동을 표현하는 운동방정식의 차수도 역시 감소하게 된다. 슬라이딩모드하의 시스템은 변수변동 및 외란에 대해 매우 강건한 성질을 나타낸다. 또한, 대부분의 실제 시스템에 있어서 슬라이딩운동은 사전에 설계된 불연속면의 위치에 의해 결정된다. 이것은 주어진 제어문제가 두 가지의 작은 문제로 분리될 수 있음을 의미한다. 즉, 제어기는 슬라이딩모드를 발생시키는 역할만을 하도록 설계하고, 슬라이딩모드에서 요구되는 운동특성은 이 불연속면의 방정식을 알맞게 선택함으로써 얻을 수 있다.<sup>(4~8)</sup>

한편, 이와 같은 슬라이딩모드제어기는 대부분 연속시간 시스템에 근거하여 설계되어 왔으나, 디지털 컴퓨터를 이용하여 실제 공학 시스템에 적용할 때 필연적으로 샘플링과정(sampling process)을 거치게 된다. 연속시간 슬라이딩모드제어(continuous-time sliding mode control; CSMC) 이론에서 샘플링과정을 정확히 고려하는 것은 매우 어려우며, 일반적으로 매우 빠른 샘플링시간을 선택한다. 이 때문에 슬라이딩평면상에서 제어입력에 심한 떨림현상(chattering)이 발생하여 작동기 등 시스템의 구성요소가 해로운 영향을 받게 된다. 특히 유연구조물의 진동제어에 있어 역진동의 발생 우려가 있다. 이처럼 슬라이딩모드제어기 설계에 있어서 그 이론적 측면과 실제적 적용 사이에는 큰 차이가 있으며, 이를 극복하기 위해서 샘플링과정을 직접 고려한 이산시간 슬라이딩모드제어(discrete-time sliding mode control; DSMC)에 대한 연구가 필요하게 되었다.<sup>(9~12)</sup>

이산시간 슬라이딩모드제어와 연속시간 슬라이딩모드 제어의 가장 큰 차이점은 슬라이딩모드 존재조건을 결정하는 방법상에 있다. Sarpurk 등<sup>(9)</sup>은 이산시간 시스템에 대하여 안정한 슬라이딩모드의 존재조건을 제시하였다. 이로 인해 불연속계인(이득)은 상태공간상에 규정된 슬라이딩 평면식과 RP(representative point)의 위치에 따라 그 하한

(lower bound)과 상한(upper bound)을 갖게 된다. 그러나 시스템에 불확실성(uncertainty)이 존재할 경우 샘플링 간격으로 인해 슬라이딩평면의 근방에 불연속계인을 구할 수 없는 영역이 생기게 된다. 그런데, 이 영역에서 연속시간 슬라이딩모드제어 이론의 슬라이딩모드 존재조건만을 고려하여 제어기를 설계하면 심한 떨림현상이 발생하게 되고 시스템이 불안정해지기도 한다. Furuta<sup>(10)</sup>와 Wang 등<sup>(11)</sup>은 이 구간을 슬라이딩영역(sliding region)이라 하여 등가제어 입력만을 사용함으로써 원치 않는 떨림현상을 줄였다. 그러나, 시스템 상태궤적이 슬라이딩영역으로만 수렴할 뿐, 슬라이딩평면으로 수렴하는 것을 보장할 수 없게 되어서 마치 슬라이딩영역의 경계선상에서 슬라이딩운동을 하는 것과 비슷한 형태가 된다. 슬라이딩영역에서의 문제를 해결하는 하나의 방법으로 Furuta 등<sup>(12)</sup>은  $\beta$ -등가제어기( $\beta$ -equivalent controller)라는 것을 제시하였는데, 이는 등가제어기에 리칭모드(reaching mode)의 특성을 추가하여 상태궤적이 슬라이딩평면으로 보다 빨리 도달될 수 있도록 한 것이다. 그러나 이를 사용할 경우 슬라이딩영역이 증대되는 단점이 있다.

본 연구의 목적은 정합조건을 만족하지 않는 시스템 변수변동 및 외란이 존재하는 스마트 유연구조물 시스템에 대하여 강건한 진동제어를 수행하기 위해, 기존의 단점을 개선한 이산시간 퍼지 슬라이딩모드제어기를 제시하는데 있다. 이를 위해 우선 압전필름작동기를 갖는 스마트 유연구조물의 지배방정식을 도출하였고, 이를 불확실성이 포함된 상태공간 이산시간 시스템으로 구성하였다. 등가제어기 설계시 슬라이딩영역의 증가없이 상태 궤적이 슬라이딩평면으로 보다 빨리 수렴할 수 있도록 등가제어기 이원화법(equivalent controller separation method)을 도입하였다. 즉, 슬라이딩영역 안에서는  $\beta$ -등가제어기를 사용하고, 슬라이딩영역밖에서는 일반 등가제어기와 불연속제어기를 동시에 사용하는 방법이다. 불연속제어기는 시변(time-varying) 피드백 제어제인을 사용하여 슬라이딩 및 수렴조건이 모두 만족하도록 설계하였다. 불연속 제어제인이나  $\beta$ 값은 상태궤적의 위치와 슬라이딩 평면과의 관계에 따라 변하기 때문에 알맞는 값을 선택하기가 용이하지 않다. 본 연구에서는 제어 성능에 중요한 영향을 미치는  $\beta$ 값과 불연속 제어제인의 알맞은 결정을 위해 퍼지제어이론을 도입하였

으며, 이와 연계된 이산시간 퍼지-슬라이딩모드제어기(discrete-time fuzzy-sliding mode controller; DFSMC)를 구성하였다. 제안된 제어기의 우수성과 강인성을 입증하기 위하여 압전필름작동기로 구성된 스마트구조물의 강제 및 랜덤진동에 대한 제어효과를 실험적으로 고찰하였다.

### 2. 시스템 모델링

본 연구에서 고려한 스마트구조물은 Fig. 1과 같이 복합재료 외관보의 한쪽 면에 압전필름작동기를 부착한 형태이다.

압전필름에 공급전압  $V(t)$ 가 가해졌을 때 압전필름의 변형으로 인해 다음과 같은 굽힘모멘트가 발생된다.<sup>(13)</sup>

$$M = -d_{31} \cdot \frac{t_1 + t_2}{2} \cdot \frac{E_1 E_2 t_1 b}{E_1 t_1 + E_2 t_2} \cdot V(t) = c \cdot V(t) \tag{1}$$

여기서,  $d_{31}$ 은 압전필름의 압전 변형률상수이며,  $E_1$ 과  $E_2$ 는 복합재료 및 압전필름의 Young's Modulus를 나타낸다.  $c$ 는 외관보의 물리적, 기하학적 성질과 압전필름의 성질에 의해 결정되는 상수이다. 제안된 구조물 시스템의 운동에너지와 위치에너지를 Hamilton의 법칙에 적용하면 다음과 같은 지배방정식과 경계조건을 얻을 수 있다.

$$EI \frac{\partial^4 y(x, t)}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2} = 0 \tag{2}$$

$$\begin{aligned} y(x, t) \Big|_{x=0} &= 0 \\ \frac{\partial y(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=0} &= 0 \\ EI \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial x^2} \Big|_{x=L} &= -c \cdot V(t) \\ EI \frac{\partial^3 y(x, t)}{\partial x^3} \Big|_{x=L} &= m_T \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2} \Big|_{x=L} \end{aligned} \tag{3}$$

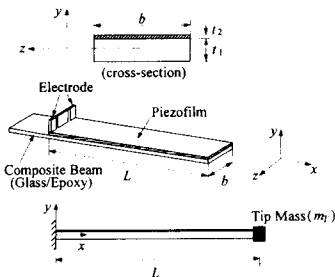


Fig. 1 Schematic diagram of the smart structure

여기서,  $EI$ 와  $\rho A$ 는 스마트구조물의 유효 굽힘강성(effective bending stiffness)과 단위길이당 질량을 각각 나타내고,  $m_T$ 는 선단질량(tip mass)이다.

제어기 설계를 위해 모드가정법(assumed-mode method)을 이용하면, 변위  $y(x, t)$ 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} \phi_i(x) \cdot q_i(t) \tag{4}$$

여기서,  $\phi_i(x)$ 와  $q_i(t)$ 는  $i$ 번째 모드의 시스템 고유함수(eigenfunction) 및 일반화 좌표(generalized coordinate)이다. 따라서 Lagrange 방정식을 이용하여 각 모드에 대한 비연계 상미분방정식을 얻은 후,  $m$ 개의 진동모드를 주 제어모드로 고려하면 다음과 같이 상태공간 시스템 모델로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}u(t) + \mathbf{f}(t) \\ y(t) &= \mathbf{E}\mathbf{x}(t) \end{aligned} \tag{5}$$

여기서,

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= [q_1 \dot{q}_1 q_2 \dot{q}_2 \dots q_m \dot{q}_m]^T = [x_1 x_2 \dots x_{2m}]^T \\ u(t) &= V(t) \\ \mathbf{f}(t) &= [0 \ f_1(t) \ 0 \ f_2(t) \ \dots \ 0 \ f_m(t)]^T \\ \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & & & \\ -\omega_1^2 & -2\zeta_1\omega_1 & 0 & & \\ & & 0 & 1 & \\ & & & & -\omega_m^2 & -2\zeta_m\omega_m \end{bmatrix} \\ \mathbf{B} &= -\frac{c}{I_1} \left[ 0 \int_0^L \frac{\partial^2 \phi_1}{\partial x^2} dx \ 0 \int_0^L \frac{\partial^2 \phi_2}{\partial x^2} dx \ \dots \ 0 \int_0^L \frac{\partial^2 \phi_m}{\partial x^2} dx \right]^T \\ \mathbf{E} &= [\phi_1(L) \ 0 \ \phi_2(L) \ 0 \ \dots \ \phi_m(L) \ 0] \end{aligned}$$

여기서,  $f_i(t)$ 는  $i$ 번째 모드를 가진시키는 외란(예를 들어, 강제진동의 경우 외부 가진)으로 그 크기가 한정되어 있다고 가정한다.  $\omega_i$ 와  $\zeta_i$ 는 각 모드의 고유진동수 및 감쇠비율,  $I_1$ 는 일반화 질량(generalized mass)을 나타낸다.

유연보 선단에 작동시 발생할 수 있는 가변질량 및 제추상의 오차 등으로부터  $\omega$ , 및  $\zeta$  등에 변수변동이 나타나게 되고, 이를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\omega_i = \omega_{i,0} + \delta\omega_i(t), \quad \zeta_i = \zeta_{i,0} + \delta\zeta_i(t) \tag{6}$$

여기서,  $\omega_{i,0}$  및  $\zeta_{i,0}$ 는 각각 알고 있는  $i$ 번째 모드

의 시스템 고유진동수 및 감쇠비의 공칭값(nominal value)을 나타내며,  $\delta\omega_i(t)$  및  $\delta\zeta_i(t)$ 는 이에 상응하는 변수변동을 나타낸다. 따라서 제안된 스마트구조물은 이러한 변수변동을 고려하여 다음과 같은 단일입력 선형 불확실성 시스템으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= (\mathbf{A}_0 + \Delta\mathbf{A}(t))\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}u(t) + \mathbf{f}(t) \\ &= \mathbf{A}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}u(t) + \mathbf{f}(t) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, 시스템행렬식과 입력행렬의 모든 요소들은 부드러운 함수(smooth function)라고 가정한다.

주어진 미분방정식 형태의 연속시간 시스템 (7)은 ZOH(zero-order-hold)방법을 이용하여 이산화시켜 다음과 같이 차분방정식 형태의 이산시간 시스템으로 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{x}(k+1) = \Phi(k)\mathbf{x}(k) + \Gamma(k)u(k) + \mathbf{d}(k) \quad (8)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \Phi(k) &= \exp\left(\int_{t_k}^{t_{k+1}} \mathbf{A}(\tau) d\tau\right) \\ &\cong \exp\left(\mathbf{A}\left(\frac{t_k + t_{k+1}}{2}\right)T\right) \\ \Gamma(k) &= \int_{t_k}^{t_{k+1}} \exp\left(\int_{\tau}^{t_{k+1}} \mathbf{A}(\alpha) d\alpha\right) \mathbf{B}(\tau) d\tau \\ &\cong \int_0^T \exp\left(\mathbf{A}\left(\frac{t_k + t_{k+1}}{2}\right)\tau\right) d\tau \mathbf{B}\left(\frac{t_k + t_{k+1}}{2}\right) \\ \mathbf{d}(k) &\cong \int_0^T \exp\left(\mathbf{A}\left(\frac{t_k + t_{k+1}}{2}\right)\tau\right) \mathbf{f} \\ &\quad \times ((k+1)T - \tau) d\tau \end{aligned}$$

상기식에서  $T$ 는 샘플링간격,  $k$ 는 샘플링횟수이다. 식 (8)을 다시 공칭부(nominal part)와 불확실성을 포함하는 부분으로 나누어 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= (\Phi_0 + \Delta\Phi(k))\mathbf{x}(k) + (\Gamma_0 + \Delta\Gamma(k)) \\ &\quad \times u(k) + \mathbf{d}(k) \end{aligned} \quad (9)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \Phi_0 &= \begin{bmatrix} \phi_{11,0} & \cdots & \phi_{1n,0} \\ \vdots & & \\ \phi_{m1,0} & \cdots & \phi_{mn,0} \end{bmatrix}, \quad \gamma_0 = \begin{bmatrix} \gamma_{1,0} \\ \vdots \\ \gamma_{n,0} \end{bmatrix} \\ \phi_{ij,0} &= \frac{\phi_{ij,\min} + \phi_{ij,\max}}{2}, \quad \gamma_{i,0} = \frac{\gamma_{i,\min} + \gamma_{i,\max}}{2} \\ i, j &= 1, \dots, n(=2m) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta\Phi(k) &= \begin{bmatrix} \delta\phi_{11}(k) & \cdots & \delta\phi_{1n}(k) \\ \vdots & & \\ \delta\phi_{m1}(k) & \cdots & \delta\phi_{mn}(k) \end{bmatrix} \\ \Delta\Gamma(k) &= \begin{bmatrix} \delta\gamma_1(k) \\ \vdots \\ \delta\gamma_n(k) \end{bmatrix} \\ \mathbf{d}(k) &= \begin{bmatrix} d_1(k) \\ \vdots \\ d_n(k) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

그리고 변수변동 및 외란의 최대값을 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} \bar{\phi}_{ij} &\equiv \max(|\delta\phi_{ij}(k)|) = \phi_{ij,\max} - \phi_{ij,0} \\ \bar{\gamma}_i &\equiv \max(|\delta\gamma_i(k)|) = \gamma_{i,\max} - \gamma_{i,0} \\ \bar{d}_i &\equiv \max(|d_i(k)|), \quad i, j=1, \dots, n \end{aligned} \quad (10)$$

이산화 과정에서 식 (8)과 같이 시스템행렬의 지수 함수를 취함에 따라 불확실성의 요소들이 서로 연계되고, 이 때문에 이산시간 시스템에서는 일반적으로 정합조건<sup>(14)</sup>이 만족되지 않는다.

### 3. 이산시간 슬라이딩모드제어기 설계

#### 3.1 등가제어기

이산시간 시스템 (9)에서 슬라이딩모드제어기  $u(k)$ 를 설계하기 위하여 우선 슬라이딩모드가 발생하게 되는 슬라이딩평면을 다음과 같이 정의한다.

$$s(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) = 0 \quad (11)$$

여기서,  $\mathbf{C} = [c_1 \cdots c_n]$ 는 슬라이딩평면 계수벡터(sliding surface gradient vector)이다. 이 평면계수는 공칭 시스템의 슬라이딩평면 운동이 안정되도록 극점배치기법을 이용하여 결정한다.<sup>(5)</sup>

슬라이딩평면 (11)과 공칭 시스템에 기초하여 다음과 같이  $\Delta s(k)$ 가 영(zero)이 되도록 등가제어기  $u_{eq}(k)$ 를 설정한다.

$$\begin{aligned} \Delta s(k) &= s(k+1) - s(k) \\ &= \mathbf{C}(\Phi_0\mathbf{x}(k) + \Gamma_0 u(k)) - \mathbf{C}\mathbf{x}(k) = 0 \end{aligned}$$

따라서,

$$\begin{aligned} u_{eq}(k) &= \mathbf{F}_{eq}\mathbf{x}(k) \\ &= -(\mathbf{C}\Gamma_0)^{-1}(\mathbf{C}\Phi_0 - \mathbf{C})\mathbf{x}(k) \end{aligned} \quad (12)$$

즉, 등가제어기는 시스템의 안정성을 고려하여 설계된 슬라이딩평면상에 상태궤적이 있을 때 계속해서 그 평면을 따라 운동이 일어나도록 하게 하는

역할을 한다. 그러므로 슬라이딩평면 상에서 시스템은 다음 식에 의해 지배된다.

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= (\Phi_0 + \Gamma_0 \mathbf{F}_{eq}) \mathbf{x}(k) = \Phi_{eq} \mathbf{x}(k) \\ s(k) &= \mathbf{C} \mathbf{x}(k) = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

여기서,  $\Phi_{eq}$ 의 고유치중 하나는 1이 되고, 나머지  $n-1$ 개는 슬라이딩평면 설계시에 가정한 요구고유치가 된다. 따라서 슬라이딩모드 운동중에 공칭 시스템은 임계 안정성(marginal stability)을 갖게 된다.

그러나, 서론에서도 언급한 바와 같이 시스템에 변수변동이나 외란이 있으면 슬라이딩영역이 존재하게 되고, 상태제적이 슬라이딩영역으로만 수립될 뿐 정확히 슬라이딩평면으로 수립하는 것을 보장할 수 없게 된다. 이를 보상하기 위해 본 논문에서는 등가제어기 이원화법을 제안하고자 한다. 상태제적이 슬라이딩영역 밖에 존재할 경우에는 일반적인 등가제어기를 사용하고, 안에 존재할 경우에는  $\beta$ -등가제어기를 사용하여 슬라이딩영역의 증가없이 공칭시스템이 영역 안에서 점근 안정성을 갖도록 한다. 즉, 슬라이딩영역 안에서는  $\Delta s_\beta(k)$ 를 다음과 같이 정의하여, 이로부터  $\beta$ -등가제어기를 설계한다.

$$\begin{aligned} \Delta s_\beta(k) &= s(k+1) - \beta s(k) \\ &= \mathbf{C} (\Phi_0 \mathbf{x}(k) + \Gamma_0 u(k)) - \beta \mathbf{C} \mathbf{x}(k) \\ &= 0, \quad 0 \leq \beta < 1 \end{aligned}$$

따라서,

$$\begin{aligned} u_{eq,\beta}(k) &= \mathbf{F}_{eq,\beta} \mathbf{x}(k) \\ &= -(\mathbf{C} \Gamma_0)^{-1} (\mathbf{C} \Phi_0 - \beta \mathbf{C}) \mathbf{x}(k) \end{aligned} \quad (14)$$

여기서,  $\beta$ 값은 다음 절에서 설계하게 될 불연속 제어기의 제어제인과 관계가 있으며, 또한 RP의 위치와 슬라이딩평면과의 관계에 따라 변할 수 있다. 따라서 시스템 특성변화에 따라 알맞게 선택되어야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 퍼지이론을 도입하였으며, 제4장에서 제어규칙을 기술한다.

### 3.2 불연속 제어기

상대공간상에 규정된 슬라이딩평면에서 슬라이딩모드를 발생시키기 위해 알맞은 불연속 제어기를 사용하여야 한다. 이산시간 시스템에서, 슬라이딩모드제어기는 다음과 같은 조건을 만족시켜야 한다.

$$|s(k+1)| < |s(k)| \quad (15)$$

상기 식으로부터 다음의 두 조건을 얻을 수 있다.

$$(s(k+1) - s(k)) \operatorname{sgn}(s(k)) < 0 \quad (16a)$$

$$(s(k+1) + s(k)) \operatorname{sgn}(s(k)) > 0 \quad (16b)$$

식 (16a)는 슬라이딩모드를 발생시키는 조건(sliding condition)이 되고, 식 (16b)는 발생된 슬라이딩모드가 슬라이딩평면으로 수렴하도록 하는 조건(convergence condition)이 된다. 위의 두 조건에 의해 불연속 제어기의 하한과 상한이 결정된다.

불연속 제어기는 시스템의 상태제적이 슬라이딩영역 밖에 존재할 때 등가제어기와 함께 사용되어 상태제적을 슬라이딩영역 안으로 수립시키는 역할을 한다. 따라서 불확실성 시스템 (9)에 대한 전체 제어입력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u(k) = u_{eq}(k) + u_a(k) \quad (17)$$

여기서,  $u_{eq}(k)$ 는 등가 제어입력이고,  $u_a(k)$ 는 불연속 제어입력이다. 불연속 제어기의 설계를 위해서는 먼저,  $\mathbf{C}(\Gamma_0 + \Delta \Gamma)$ 가 영(zero)이 되지 않아야 한다. 그리고 이 가정은 다음과 같은 조건식으로 표현될 수 있다.

$$\left| \sum_{i=1}^n c_i \gamma_{i,0} \right| > \sum_{i=1}^n |c_i \bar{\gamma}_i| \quad (18)$$

이로부터 이 가정은 입력행렬 불확실성의 크기에 대한 한계성으로 해석될 수 있음을 알 수 있다. 또한, 이 조건으로부터 항상  $\operatorname{sgn}(\mathbf{C}(\Gamma_0 + \Delta \Gamma)) = \operatorname{sgn}(\mathbf{C} \Gamma_0)$ 이 됨을 알 수 있다. 이제 불확실성이 있는 제어시스템 (9)에 대해서 슬라이딩모드 존재조건 (16)을 만족하는 불연속 제어기를 다음 정리에 요약하여 제안한다.

**정리:** 불확실성을 포함하는 이산시간 시스템 (9)에 있어서 등가제어기 (12)와 불연속 제어기 (19)로 이루어지는 이산시간 슬라이딩모드 제어기 (17)은 정합조건을 만족하지 않는 불확실성을 포함하는 시스템 (9)의 상태제적을 슬라이딩영역 밖으로부터 슬라이딩 영역 안으로 수립시킨다.

$$u_a(k) = -h(k) \operatorname{sgn}(\mathbf{C} \Gamma_0 s(k)) \sum_{i=1}^n |x_i(k)| \quad (19)$$

여기서,

$$\begin{cases} h_s(k) \leq h(k) \leq h_c(k) : \text{outside the sliding region} \\ h(k) = 0 : \text{inside the sliding region} \end{cases}$$

$$h_s(k) = \frac{\sup(H_2(k))}{\inf(H_1(k))}$$

$$h_c(k) = \frac{2|s(k)| - \sup(H_2(k))}{\sup(H_1(k))}$$

상기 식에서  $\inf(H_1(k))$ ,  $\sup(H_1(k))$  및  $\sup(H_2(k))$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \inf(H_1(k)) &\equiv \inf(|\mathbf{C}(\Gamma_0 + \Delta\Gamma)| \sum_{i=1}^n |x_i(k)|) \\ &= \inf(|\mathbf{C}(\Gamma_0 + \Delta\Gamma)| \sum_{i=1}^n |x_i(k)|) \\ &= (|\sum_{i=1}^n c_i \bar{\gamma}_{i,0}| - \sum_{i=1}^n |c_i \bar{\gamma}_i|) \sum_{i=1}^n |x_i(k)| \\ \sup(H_1(k)) &\equiv \sup(|\mathbf{C}(\Gamma_0 + \Delta\Gamma)| \sum_{i=1}^n |x_i(k)|) \\ &= \sup(|\mathbf{C}(\Gamma_0 + \Delta\Gamma)| \sum_{i=1}^n |x_i(k)|) \\ &= (|\sum_{i=1}^n c_i \bar{\gamma}_{i,0}| + \sum_{i=1}^n |c_i \bar{\gamma}_i|) \sum_{i=1}^n |x_i(k)| \\ \sup(H_2(k)) &\equiv \sup(\mathbf{C}(\Delta\Phi\mathbf{x}(k) + \Delta\Gamma u_{eq}(k) + \mathbf{d}(k))) \\ &= \sup(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_i \delta\phi_{ij}(k) x_j(k) \\ &\quad + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_i \delta\gamma_i(k) u_{eq} + \sum_{i=1}^n c_i d_i(k)) \\ &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |c_i \bar{\phi}_{ij} x_j(k)| \\ &\quad + |u_{eq}(k)| \sum_{i=1}^n |c_i \bar{\gamma}_i| + \sum_{i=1}^n |c_i \bar{d}_i| \end{aligned}$$

증명 : 시스템 (9)와 슬라이딩평면 (11)을 이용하여 다음과 같이  $s(k+1)$ 를 얻는다.

$$\begin{aligned} s(k+1) &= \mathbf{C}(\Phi_0 + \Delta\Phi)\mathbf{x}(k) \\ &\quad + \mathbf{C}(\Gamma_0 + \Delta\Gamma)u(k) + \mathbf{C}\mathbf{d}(k) \\ &= \mathbf{C}(\Delta\Phi\mathbf{x}(k) + \Delta\Gamma u_{eq}(k) + \mathbf{d}(k)) \\ &\quad + \mathbf{C}(\Gamma_0 + \Delta\Gamma)u_a(k) + s(k) \quad (20) \end{aligned}$$

따라서, 슬라이딩조건 (16a)로부터 다음 식을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} &[\mathbf{C}(\Delta\Phi\mathbf{x}(k) + \Delta\Gamma u_{eq}(k) + \mathbf{d}(k)) \\ &\quad + \mathbf{C}(\Gamma_0 + \Delta\Gamma)u_a(k)]\text{sgn}(s(k)) < 0 \end{aligned}$$

불연속 제어기 (19)를 위 식에 대입하면 다음과 같이  $h_s(k)$ 를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} h(k) &|\mathbf{C}(\Gamma_0 + \Delta\Gamma)| \sum_{i=1}^n |x_i(k)| \\ &> \mathbf{C}(\Delta\Phi\mathbf{x}(k) + \Delta\Gamma u_{eq}(k) + \mathbf{d}(k))\text{sgn}(s(k)) \quad (21a) \end{aligned}$$

즉, 식 (21a)에서 주어진 불확실성의 모든 범위 내에서 슬라이딩조건을 만족시키는 가장 작은  $h(k)$ 를  $h_s(k)$ 라 정의하면 이를 정리에서와 같이 나

타낼 수 있다. 그리고 식 (20)과 수렴조건 (16b)로부터 다음 식을 유도할 수 있고, 여기에 불연속 제어기 (19)를 대입하면  $h_c(k)$ 를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} &[2s(k) + \mathbf{C}(\Delta\Phi\mathbf{x}(k) + \Delta\Gamma u_{eq}(k) + \mathbf{d}(k)) \\ &\quad + \mathbf{C}(\Gamma_0 + \Delta\Gamma)u_a(k)]\text{sgn}(s(k)) > 0 \\ h(k) &|\mathbf{C}(\Gamma_0 + \Delta\Gamma)| \sum_{i=1}^n |x_i(k)| < 2|s(k)| \\ &\quad + \mathbf{C}(\Delta\Phi\mathbf{x}(k) + \Delta\Gamma u_{eq}(k) + \mathbf{d}(k))\text{sgn}(s(k)) \quad (21b) \end{aligned}$$

즉, 식 (21b)에서 주어진 불확실성의 모든 범위 내에서 수렴조건을 만족시키는 가장 큰  $h(k)$ 를  $h_c(k)$ 라 정의하면 이를 정리에서와 같이 나타낼 수 있다. 따라서 슬라이딩모드 존재조건 (16)은 만족되며, 이것으로 정리의 증명은 쉽게 완결된다.

위의 정리로부터 시스템 상태के적이 슬라이딩 영역 밖에 있을 때에는 이산시간 슬라이딩 모드의 존재 조건인 슬라이딩 조건과 수렴조건을 모두 만족하도록 불연속 제어기인  $h(k)$ 를  $h_s(k)$ 와  $h_c(k)$ 의 사이 값으로 선택하면 되고, 슬라이딩영역 안에 있을 때에는 불연속 제어기없이 등가제어기로만 제어를 수행하게 된다. 이 때 후자의 경우 등가제어기를  $\beta$ -등가제어기로 대체한다. 본 연구에서는 RP의 위치와 슬라이딩평면과의 관계에 따른 알맞은 제어기인  $h(k)$ 와  $\beta$ 값을 결정하기 위하여 퍼지이론을 도입하였다.

#### 4. 이산시간 퍼지-슬라이딩모드 제어기 구성

$\beta$ -등가제어기 (14)에서  $\beta$ 값은 물리적으로 제어기의 크기와 관계가 있다.  $\beta$ 가 0에 가까울수록 제어기가 커진다. 즉, 슬라이딩영역 안에서 외란 등의 불확실성 요소를 극복하고 강건성을 유지하기 위해서는 어느 정도 큰 제어기가 요구된다. 그러나 이에 따른 역진동 등의 부작용도 감수해야 한다. 또한, 슬라이딩영역 밖에서 불연속 제어기 (19)의 제어기인  $h(k)$ 도 유사한 특성을 갖는다. 따라서 본 연구에서는 알맞은  $\beta$ 값과 제어기인  $h(k)$ 값을 선택하기 위하여 퍼지이론을 적용하고자 한다.

최근 들어 퍼지제어기는 로봇을 비롯한 많은 전기 및 기계 시스템에 성공적으로 사용되고 오고 있다. 퍼지제어의 주요 장점은 부하외란, 시스템의 비선형성, 시스템의 변수변동 등에 의한 수학적 모델링이 불가능한 시스템에 있어서 알맞은 제어입력

으로 우수한 제어효과를 가져올 수 있다. 일반적으로 퍼지제어규칙은 경험으로부터 생성되며, 소속함수(membership function)는 시행착오를 거쳐 결정된다. Lee<sup>(15)</sup>는 위상평면(phase plane) 해석을 통해 추적오차(tracking error)와 오차변화율(error rate)을 퍼지변수로 하는 퍼지제어기를 설계하였는데, 이러한 방법은 체계적이고 간단한 퍼지제어가 실제 방법으로 널리 알려져 있다. 최근에 연속시간 슬라이딩모드제어에서도 제어입력의 변립현상을 제거하기 위해 퍼지이론을 도입하는 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>(16)</sup>

퍼지제어기를 실제로 적용할 때, 최초로 해결해야 할 사항은 퍼지제어 규칙을 어떻게 설정하느냐 하는 점이다. 이를 위해 앞 장의 정리에서 제안한 불연속 제어제인의 하한과 상한인  $h_s(k)$ 와  $h_c(k)$ 를 고려한다. 슬라이딩영역의 경계면 상에서 두 계인이 같은 값을 갖기 때문에, 이로부터 이 경계면에 대한 정보를 나타내는  $Sbound(k)$ 를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$Sbound(k) \equiv \frac{h_s(k) \cdot sup(H_1(k)) + sup(H_2(k))}{2} \quad (22)$$

이를 이용하여  $\beta$ 와  $h(k)$ 에 대한 퍼지제어의 언어적 규칙을 나타내는 조건문을 각각 다음과 같이 얻을 수 있다.

- (i) Inside the sliding region ;  
**IF**  $RP$  is far from the sliding surface,  
**THEN**  $\beta$  is small and vice versa. (23)
- (ii) Outside the sliding region ;  
**IF**  $RP$  is far from the sliding surface,  
**THEN**  $h(k)$  is large and vice versa. (24)

이러한 언어적 규칙을 갖는 퍼지제어기를 설계하기 위해  $RP$ 와 슬라이딩평면과의 거리 및 변화율에 대한 정보를 나타내는 변수를  $\beta$ 와  $h(k)$ 에 대해 각각 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} \sigma_\beta &= |s(k)| / Sbound(k) \\ \Delta\sigma_\beta &= \sigma_\beta(k) - \sigma_\beta(k-1) \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \sigma_h &= Sbound(k) / |s(k)| \\ \Delta\sigma_h &= \sigma_h(k) - \sigma_h(k-1) \end{aligned} \quad (26)$$

이와 같이 정의된 변수들을 퍼지화시킨 퍼지입력변수를 각각  $\tilde{\sigma}$ 와  $\Delta\tilde{\sigma}$ 로 규정하고, 이를 다음과 같이 다섯 가지로 분할한다.

$$\tilde{\sigma} = \{VS, SM, ME, LA, VL\}$$

$$\Delta\tilde{\sigma} = \{NL, NS, ZO, PS, PL\} \quad (27)$$

여기서,  $S, SM, ME, LA, VL$ 는 *very small, small, medium, large, very large* 를,  $NL, NS, ZO, PS, PL$ 는 *negatively large, negatively small, zero, positively small, positively large*를 각각 의미하는 퍼지값들이다. 그리고, 조건식 (23)과 (24)를 실행하기 위한 퍼지출력변수는 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} \tilde{\beta} &= \{\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5\} \\ \tilde{h} &= \{h_1, h_2, h_3, h_4, h_5\} \end{aligned} \quad (28)$$

여기서,  $\tilde{\beta}$ 와  $\tilde{h}$ 는 각각  $\beta$ 와  $h(k)$ 를 퍼지화시킨 변수들이며,  $\beta_1, \dots, \beta_5, h_1, \dots, h_5$ 는 퍼지값을 나타낸다. 이러한 변수들로 이루어진 퍼지제어기의 출력력 관계는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \tilde{\sigma}, \Delta\tilde{\sigma} &\rightarrow \tilde{\beta} : \text{inside the sliding region} \\ \tilde{\sigma}, \Delta\tilde{\sigma} &\rightarrow \tilde{h} : \text{outside the sliding region} \end{aligned} \quad (29)$$

퍼지제어기 설계방식을 먼저 각 상태의 특징적인 점을 선택하여 그 곳에서 어떤 제어를 수행하면 좋겠는가를 기술하게 된다. 제5장에서 스마트구조물의 진동제어에 적용하게 될  $\beta$ 와  $h(k)$ 에 대해 다음과 같은 25개의 퍼지제어규칙을 보여주는 표를 Table 1과 Table 2에 각각 나타내었다.

**Table 1** Linguistic fuzzy rule base for the  $\beta$

$\Delta\tilde{\sigma} \backslash \tilde{\sigma}$	VL	LA	ME	SM	VS
NL	$\beta_1$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_3$
NS	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_3$
ZO	$\beta_2$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_3$	$\beta_4$
PS	$\beta_2$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$	$\beta_4$
PL	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$	$\beta_4$	$\beta_5$

**Table 2** Linguistic fuzzy rule base for the  $h(k)$

$\Delta\tilde{\sigma} \backslash \tilde{\sigma}$	VL	LA	ME	SM	VS
NL	$h_2$	$h_3$	$h_3$	$h_4$	$h_5$
NS	$h_2$	$h_2$	$h_3$	$h_4$	$h_5$
ZO	$h_2$	$h_2$	$h_3$	$h_3$	$h_4$
PS	$h_1$	$h_2$	$h_2$	$h_3$	$h_4$
PL	$h_1$	$h_1$	$h_2$	$h_3$	$h_3$

- $R_{\beta,11}$ : IF  $\tilde{\sigma}$  is VL and  $\Delta\tilde{\sigma}$  is NL inside the sliding region, THEN  $\tilde{\beta}$  is  $\beta_1$
- ⋮
- $R_{\beta,55}$ : IF  $\tilde{\sigma}$  is VS and  $\Delta\tilde{\sigma}$  is PL inside the sliding region, THEN  $\tilde{\beta}$  is  $\beta_5$  (30)
- $R_{h,11}$ : IF  $\tilde{\sigma}$  is VL and  $\Delta\tilde{\sigma}$  is NL outside the sliding region, THEN  $\tilde{h}$  is  $h_1$
- ⋮
- $R_{h,55}$ : IF  $\tilde{\sigma}$  is VS and  $\Delta\tilde{\sigma}$  is PL outside the sliding region, THEN  $\tilde{h}$  is  $h_3$  (31)

여기서,  $\beta_1$ 은 0에  $\beta_5$ 는 1에 가까운 값으로,  $h_1$ 은  $h_s(k)$ 에  $h_5$ 는  $h_c(k)$ 에 가까운 값으로 선택한다. 이와 같은 퍼지제어규칙은 Li와 Lau<sup>(17)</sup>가 제안한 추론법을 사용하여 추론이 가능하다.

이제, 앞 장에서 설계한 이산시간 슬라이딩모드 제어기와 퍼지제어기를 합성시켜 Fig. 2와 같은 이산시간 퍼지-슬라이딩모드제어기를 구성할 수 있다. 퍼지제어기의 구조는 퍼지화도입부(fuzzification), 추론부(decision-making logic), 비퍼지화부(defuzzification) 등으로 구성된다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 퍼지화 도입부에서는 입력변수  $\sigma_\beta$ ,  $\Delta\sigma_\beta$  또는  $\sigma_h$ ,  $\Delta\sigma_h$ 의 값을 측정해서 퍼지집합의 라벨(label)로 보여지는 알맞은 언어적 값  $\tilde{\sigma}$ 와  $\Delta\tilde{\sigma}$ 로 변환하고, 추론부에서는 퍼지제어기의 핵심부로서 퍼지화도입부에서 변환된  $\tilde{\sigma}$ 와  $\Delta\tilde{\sigma}$ 의 값을 입력변수로 하여 제어규칙 (30) 또는 (31)을 실행하며, 최종적으로  $\beta$  또는  $h(k)$ 를 추론하게 된다. 비퍼지화부에서는 출력 퍼지값을 실제 제어입력으로 사용하기 위해서 추론부에서 계산된 퍼지값  $\tilde{\beta}$  또는  $\tilde{h}(k)$ 를 하나의 수치 값으로 변환한다. 이와 같이 설계된 이산시간 퍼지-슬라이딩모드제어기의  $\beta$ -등가제어기 및 불연속 제어기를 수식으로 나타내면 다음

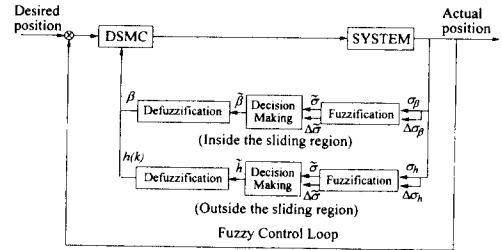


Fig. 2 A block-diagram of the proposed DFSMC

과 같다.

$$u_{eq,\beta}(k) = -(CI_0)^{-1}(C\Phi_0 - \beta(\tilde{\sigma}, \Delta\tilde{\sigma})C)x(k) \quad (32)$$

$$u_a(k) = -h(\tilde{\sigma}, \Delta\tilde{\sigma})\text{sgn}(CI_{0s}^T(k)) \sum_{i=1}^n |x_i(k)| \quad (33)$$

여기서, 식 (14)의  $\beta$  및 식 (19)의  $h(k)$ 가  $\tilde{\sigma}$ 와  $\Delta\tilde{\sigma}$ 의 함수로 바뀌었음을 쉽게 알 수 있다. 식 (33)에서 퍼지논리에 의해  $h(k)$  값을 적절하게 선택함으로써 부호가 급격하게 변하는 sgn 함수의 영향을 상당히 완화시킬 수 있다.

### 5. 실험결과 및 고찰

제안된 스마트구조물을 구성하는 모재는 압전재료와의 절연효과를 위해 복합재료(glass/epoxy)를 사용하였고, 그 재료상수와 압전필름의 세원은 Table 3과 같다.

제어기 설계시 지배적인 첫번째 및 두번째 진공모드를 고려하였으며, 선단질량 부재시 모델변수는 실험을 통하여 다음과 같이 얻었다.  $\omega_1=11.8$  Hz,  $\omega_2=75$  Hz,  $\zeta_1=0.0072$ ,  $\zeta_2=0.0043$ . 그리고 위치

Table 3 Dimensional and mechanical properties of the composite beam and the piezofilm

Composite beam (glass/epoxy)				
Young's modulus	Thickness	Density	Width	Length
6.4 GPa	0.65 mm	1865 kg/m <sup>3</sup>	26.6 mm	170 mm
Piezofilm (PVDF)				
Young's modulus	Thickness	Density	Width	Length
2 GPa	0.11 mm	1780 kg/m <sup>3</sup>	26.6 mm	170 mm
Piezoelectric strain constant			$23 \times 10^{-13} \frac{\text{m/m}}{\text{V/m}}$	



상대변수는 선단 변위센서로부터 직접 얻었으며, 속도상대변수는 지차수 상태관측기를 통하여 예측하였다.<sup>(18)</sup> 한편, 제어된 제어기의 상진함을 입증하기 위하여 다음과 같은 변수변동을 제어기 설계시 부가하였다.  $\omega_1=11.8\text{ Hz}\pm 18\%$ ,  $\omega_2=75\text{ Hz}\pm 18\%$ ,  $\zeta_1=0.0072\pm 10\%$ ,  $\zeta_2=0.0043\pm 10\%$ . 변수변동의 크기는 사용된 실험질량(2.0 g, 모재질량의 30%)에 따른 시스템변수의 변화를 고려하여 알맞게 설정하였다. 제어기 구현을 위한 샘플링 간격은 0.01 sec로 설정하였다.

본 연구에서 사용된 실험장치의 개략도는 Fig. 3과 같다. 비접촉식 변위센서(noncontacting prox-

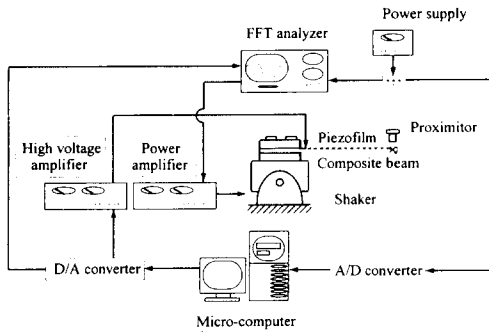


Fig. 3 Experimental apparatus for vibration control

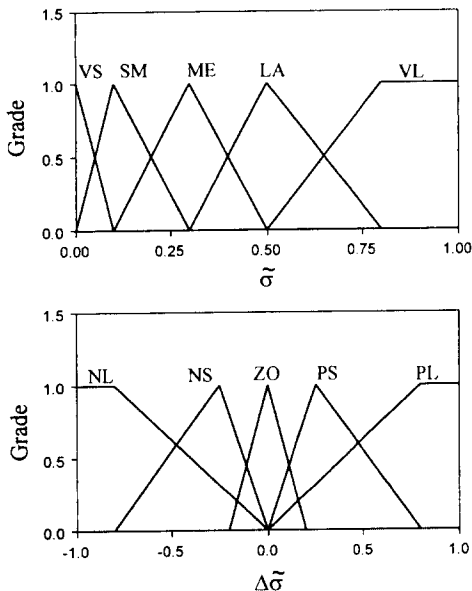


Fig. 4 Membership functions of fuzzy input variables for the smart structure

imator)를 이용하여 외란보 선단에서의 변위를 측정하고, A/D 변환기를 통해 디지털신호로 변환하여 마이크로 컴퓨터로 보내게 된다. 컴퓨터에서는 변위센서로부터의 위치성분과 샘플링 간격 동안의 두 데이터의 증가로부터 속도성분을 계산하여 슬라이딩평면을 구성하고, 제어된 이산시간 퍼지 슬라이딩면도제어 알고리즘에 의해 압전필름작동기로 공급되는 전압을 결정하게 된다. 컴퓨터에서 생성된 제어입력 전압은 D/A 변환기와 1000배 DC 전압증폭기(voltage amplifier)를 통해 압전필름에 공급되어 제어모멘트를 생성시킨다. 그리고 실험결과를 신호분석기(FFT analyzer)를 이용하여 해석한다.

제어된 DFSMC를 이용하여 스마트구조물의 진동제어를 수행하기 위해 사용된 퍼지입력변수의 소속함수와 출력변수의 곡면이 Fig. 4와 Fig. 5에 각각 나타나 있다. 슬라이딩면역 안에서의  $\beta$ 값과 영어발에서의  $h$ 값에 대하여 동일한 소속함수를 사용하였다. 한편, Fig. 5에 주어진 동작제어기의 배개

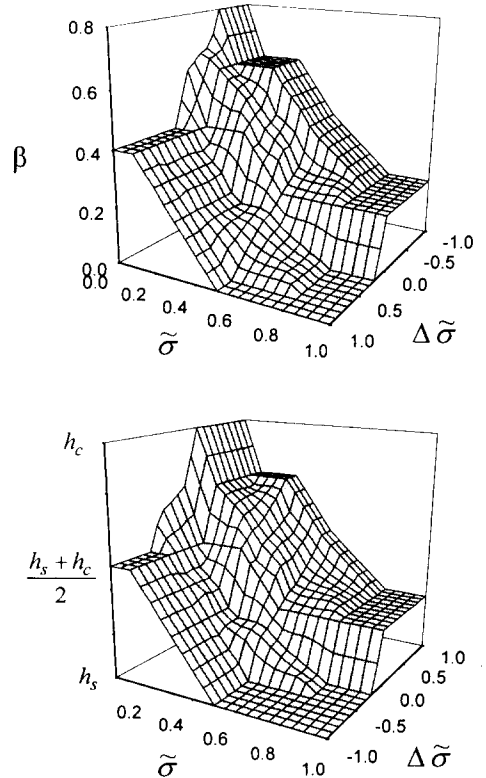
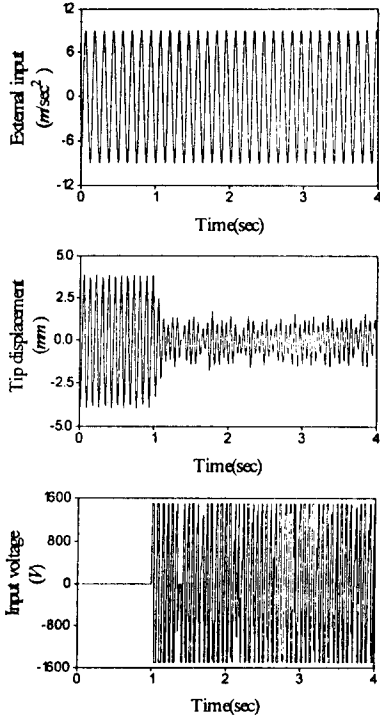
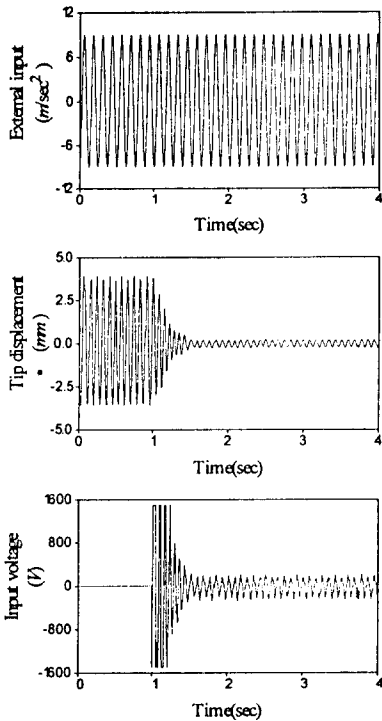


Fig. 5 Surfaces of fuzzy output variables for the smart structure

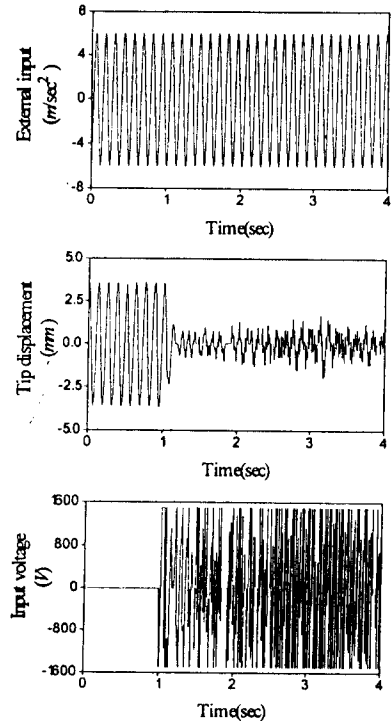


(a) Conventional

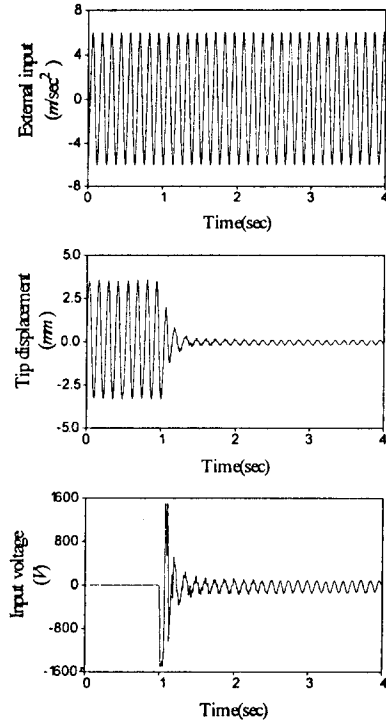


(b) Proposed

Fig. 6 Forced vibration control responses without tip mass

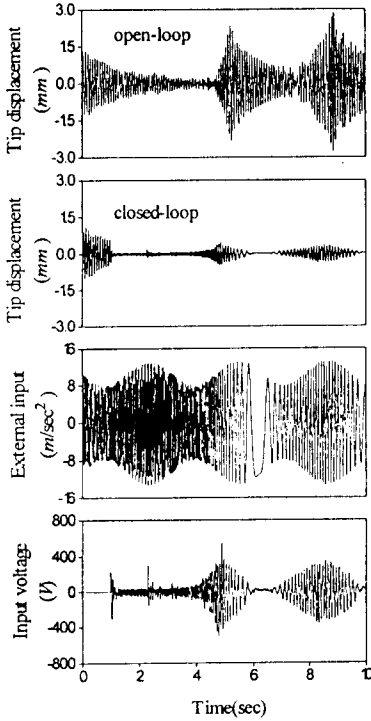


(a) Conventional

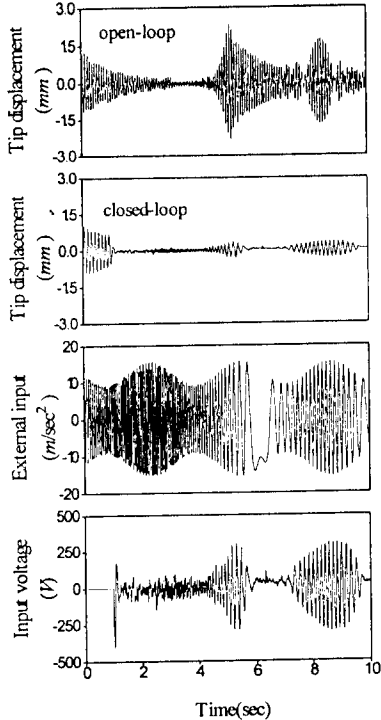


(b) Proposed

Fig. 7 Forced vibration control responses with tip mass



(a) Without tip mass



(b) With tip mass

Fig. 8 Random vibration control responses with the proposed DFSC

변수인  $\beta$  값과 불연속 제어기의 개인인  $h$  값은 출력 변수  $\beta$  와  $h$  에 의해 결정되는 것으로, Table 1과 2에 주어진 제어규칙을 그대로 보여주고 있다.

Fig. 6과 Fig. 7은 선단질량 유무시의 강제진동제어에 대한 실험결과를 나타낸 것이다. 기존의 방법 (conventional)은 등가제어기 이원화방법을 적용하지 않은 것을 의미한다. 한편, 사용된 압전필름의 파괴전압(breaking voltage)을 고려하여 모든 실험의 경우 입력전압의 최고치는  $\pm 1.5$  kV로 제한하였다. 실험결과에서 보듯이 기존 방법의 경우 매우 큰 잔여진동이 남게 되는데, 이는 상태궤적이 슬라이딩영역안에 머물지 못하고 경계면 상에서 슬라이딩운동을 하기 때문이다. 다시 말하여, 슬라이딩영역 밖으로 나가면 불연속 제어기가 작동되어 큰 제어입력이 공급되지만, 영역안에 들어오게 되면 외란(강제진동 크기)을 이기지 못하는 작은 제어입력만이 가해져서 다시 영역밖으로 나가는 거동을 계속하기 때문이다. 그러나 제안된(proposed) 이산시간 퍼지-슬라이딩모드제어기의 경우에는 상태궤적에 따라 알맞게 변화하는  $\beta$  값과  $h$  값이 공급되어 잔여진동의 크기가 현저하게 감소되었다. 또한 공급되는 제어입력의 크기가 작고 매우 부드러움을 고찰할 수 있다.

제안된 제어기의 효율성과 강건성을 보다 잘 보이기 위해 일정한 정현파 가진대신 랜덤(random) 가진에 대한 제어실험을 수행하여 그 결과를 Fig. 8에 나타냈다. 그림에서 보는 바와 같이 주파수와 진폭의 크기가 변화하는 가진에 대해 비교적 양호한 진동제어효과를 가져온다. 이는 고유주파수와 같은 변수변동과 시간에 대해 변화는 외란(가진)이 존재하여도 제안된 제어기가 매우 강건하게 작동되고 있음을 입증해 주는 결과이다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 시스템 변수변동 및 외란이 존재하는 스마트 유연구조물 시스템의 진동제어를 수행하기 위해 새로운 이산시간 퍼지-슬라이딩모드제어기를 설계하였다. 등가제어기 설계시, 기존의 이산시간 슬라이딩모드제어기법 상에서 발생하는 슬라이딩영역의 증가문제를 해결하기 위하여 등가제어기 이원화법을 제안하였다. 그리고, 상태궤적의 위치와 슬라이딩평면의 관계에 따라 알맞는 제어변수를 선정하기 위해 퍼지이론을 연계한 이산시간 퍼

지-슬라이딩모드제어기를 구성하였다. 압전필름을 작동기로 하는 스마트구조물에 적용하여 강제진동 제어 실험을 수행함으로써 제안된 기법의 효율성 및 강건성을 입증하였다. 특히 부드럽고 알맞은 크기의 제어전압 공급에 의해 기존의 방법에서 발생되는 잔여진동을 현저하게 감소시키는 제어결과를 얻었다. 또한, 시간에 따라 주파수의 크기가 변화하는 외란에 대해서도 강건한 진동제어 효과를 가져왔다. 본 연구에서 제안된 이산시간 퍼지-슬라이딩모드제어기법은 스마트구조물의 진동제어 뿐만 아니라, 로봇의 위치제어 등 다양하고 광범위한 실험 혹은 비선형 불확실성 제어시스템에 확장·응용될 수 있다.

## 후 기

본 연구의 일부는 1996년도 인하대학교 교내 연구비에 의해 수행되었으며, 이에 관계자께 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Bailey, T. and Hubbard, J. E., 1985, "Distributed Piezoelectric-Polymer Active Vibration Control of a Cantilever Beam," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 8, No. 5, pp. 605~611.
- (2) 최승복, 1992, "지능복합재료의 구성과 특성," 한국항공우주학회지, 제20권, 제4호, pp. 117~129.
- (3) Watanabe, T. and Yoshida, K., 1994, "Robust Vibration Control for Flexible Structures Taking Account of Parameter Variations and Residual Dynamics," *Proc. of the 5th International Conference on Adaptive Structures*, Sendai, Japan, pp. 387~396.
- (4) Utkin, V. I., 1984, "Sliding Modes and Their Application in Variable Structure Systems," MIR Publishers, Moscow.
- (5) 박동원, 최승복, 김재문, 1994, "불확실성을 갖는 비선형 가변구조시스템의 슬라이딩 초평면 설계," 대한기계학회논문집, 제18권, 제7호, pp. 1985~1996.
- (6) Choi, S. B., Park, D. W. and Jayasuriya, S., 1994, "A Time-Varying Sliding Surface for Fast and Robust Tracking Control of Second-order Uncertain Systems," *Automatica*, Vol. 30, No. 5, pp. 899~904.
- (7) Slotine, J. J. E. and Sastry, S. S., 1983, "Tracking Control of Non-linear Systems Using Sliding Surfaces with Application to Robot Manipulators," *Int. Journal of Control*, Vol. 38, No. 2, pp. 465~492.
- (8) Young, K. K., D., 1978, "Controller Design for a Manipulator Using Theory of Variable Structure Systems," *IEEE Trans. on System, Man and Cybernetics*, Vol. SMC-8, No. 2, pp. 101~109.
- (9) Sarpturk, S. Z., Istefanopulos, Y. and Kaynak, O., 1987, "On the Stability of Discrete-time Sliding Mode Control Systems," *IEEE Trans. on Automatic Control*, Vol. 32, No. 10, pp. 930~932.
- (10) Furuta, K., 1990, "Sliding Mode Control of a Discrete System," *Systems and Control Letters*, Vol. 14, pp. 145~152.
- (11) Wang, W. J., Wu, G. H. and Yang, D. C., 1994, "Variable Structure Control Design for Uncertain Discrete-time Systems," *IEEE Trans. on Automatic Control*, Vol. 39, No. 1, pp. 99~102.
- (12) Furuta, K. and Pan, Y., 1993, "Discrete-time Adaptive VSS Control System Using Transfer Function," *IEEE Proc. of the 31st Conference on Decision and Control*, pp. 1434~1438.
- (13) Choi, S. B., Cheong, C. C. and Kim, S. H., 1995, "Control of Flexible Structures by Distributed Piezofilm Actuators and Sensors," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 6, No. 5, pp. 430~435.
- (14) Leitmann, G., 1981, "On the Efficacy of Non-linear Control in Uncertain Linear Systems," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 102, pp. 95~102.
- (15) Lee, C. C., 1990, "Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller-Part I, II," *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, Vol. 20, No. 2, pp. 404~435.
- (16) 김정식, 최승복, 1994, "퍼지-슬라이딩모드론 이용한 로봇의 강건추적제어," 대한기계학회논문집, 제18권, 제8호, pp. 2088~2100.

- (17) Li, Y. F. and Lau, C. C., 1989, "Development of Fuzzy Algorithms for Servo Systems," *IEEE Control Syst. Mag.*, Vol. 9, No. 3, pp. 65~72.
- (18) Choi, S. B., Cheong, C. C. and Shin, H. C., 1995, "Sliding Mode Control of Vibration in a Single-Link Flexible Arm with Parameter Variations," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 179, No. 5, pp. 737~748.