

< 논 문 >

압전필름 작동기로 구성된 스마트 유연 구조물의 강건추적제어

이철희* · 최승복**

(1995년 9월 6일 접수)

Robust Tracking Control of Smart Flexible Structures Featuring Piezofilm Actuators

Chul-Hee Lee and Seung-Bok Choi

Key Words : Smart Structure(스마트구조물), Position Tracking Control(위치추적제어), Robust Control(강건제어), Piezofilm Actuator(압전필름 작동기), Sliding Mode Control(슬라이딩모드제어)

Abstract

This paper presents a robust control of a smart flexible structure featured by a piezofilm actuator characterizing its light weight and quick response time. A mathematical governing equation for the proposed structure is derived by employing Hamilton's principle and a state space control model is subsequently obtained through modal analysis. Uncertain system parameters such as frequency variation are included in the control model. A sliding mode control theory which has inherent robustness to system uncertainties is adopted to design a tracking controller for the piezofilm actuator. Using the output information from the tip deflection sensor, a full-order observer is constructed to estimate state variables for the system. Tracking performances for desired trajectories of sinusoidal and step functions are evaluated by undertaking both simulation and experimental works.

기 호 설 명

A_1 : 복합재료 모재의 단면적

A_2 : 압전필름의 단면적

b : 복합재료 모재(또는 압전 필름)의 폭

d_i : 각 모드에 대한 외란의 크기

d_{31} : 압전 변형률상수

e : 선단 추적오차

E_1 : 복합재료 모재의 탄성계수

E_2 : 압전필름의 탄성계수

f : 외란

g : 슬라이딩 서피스의 기울기

h_1 : 복합재료 모재의 두께

h_2 : 압전필름의 두께

I_1 : 복합재료 모재의 관성모멘트

I_2 : 압전필름의 관성모멘트

I_i : 일반화 질량

k : 불연속 제어이득

L : 외팔보의 길이

R : 관측기 행렬

q_i : 일반화 모달 좌표

s : 슬라이딩 서피스

V_p : 위치에너지

*회원, 인하대학교 대학원 기계공학과

**회원, 인하대학교 기계공학과

- T_k : 운동에너지
- V : 제어입력 전압
- x_i : 상태변수
- \bar{x}_i : 관측상태변수
- y_{dt} : 외팔보의 요구선단위치
- y_e : 외팔보의 선단위치
- β_i : 고유진동수 변화의 가중치
- ε : 경계영역 두께
- ζ_i : 감쇠비
- ρ_1 : 복합재료 모재의 밀도
- ρ_2 : 압전필름의 밀도
- Φ_i : 모드형상함수
- γ_i : 감쇠비 변화의 가중치
- ω_i : 고유진동수

1. 서 론

최근 컴퓨터 등 첨단 기술의 발달은 재료의 발달과 더불어 로봇 및 우주 구조물 등의 경량화와 소형화의 구현을 가능하게 하였고, 현대 산업발전에 많은 공헌을 해 왔다. 이와 같은 발전은 산업분야 뿐만 아니라 의학, 생물학 등 여러 분야에도 큰 영향을 주었으며 점차 더욱 소형화된 구조물 시스템을 요구하고 있다. 그리고 소형 구조물 시스템에서는 그에 따른 알맞은 감지 및 추력장치 등의 연구 또한 필연적으로 요구되었고 현재 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 연구 중 소형 유연 로봇팔 및 소형 그리퍼(gripper)는 약리학에서 시편을 다루는 일, 혹은 전자현미경의 샘플을 준비하는 일 등 여러 분야에 적용될 수 있다.

그러나, 이러한 소형 유연 로봇 팔을 운전하기 위해서는 좁은 운전 영역으로 인해서 전기모터와 같은 재래식 작동기 메카니즘을 사용하는 방식은 적용 불가능하며 또한 정밀한 위치를 제어하는 것도 어렵다. 따라서 강체 로봇 메카니즘에 기초한 재래식 로봇 설계 기술은 더 이상 사용할 수 없으며 새로운 유연 로봇 매니퓰레이터(manipulator)와 이에 적합한 작동기가 필요하다. 최근 경량의 소형 유연 로봇 매니퓰레이터의 빠른 반응속도와 적은 에너지 소모 등 높은 수행능력을 달성하기 위해 소위 스마트(smart) 또는 지능(intelligent) 재료를 작동기 또는 감지기로 사용한 연구가 진행되고 있다. 지금까지 알려진 지능 재료 매체로는 전기유동유체

(electro-rheological fluid),⁽¹⁾ 형상기억합금(shape memory alloy),⁽²⁾ 그리고 압전재료(piezoelectric material)⁽³⁻¹²⁾ 등이 있다. 이중에서 압전재료는 자중에 비해 비교적 큰 힘을 발생시키고 공급된 전압에 대해 빠르게 반응하는 특징이 있다. 압전재료는 압력이 가해지면 전압이 발생하기 때문에 감지기로 사용할 수 있으며, 또한 전압을 가하면 변형이 발생하는 성질을 이용하여 작동기로 사용할 수도 있다.

압전재료와 연계된 스마트 구조물 시스템(smart structure system)에 대한 연구는 1985년에 Bailey와 Hubbard 등⁽³⁾이 외팔보의 양쪽면에 압전 필름을 붙여 진동을 제어한 것을 시작으로 많은 연구가 진행되어 오고 있다. Tzou 등⁽⁴⁾은 평판(plate) 혹은 셸(shell)형상을 지닌 구조물과 연계한 압전효과와 진동제어 효과에 대한 연구를 수행하였고, Crawley 등⁽⁵⁾은 압전재료를 작동기로 사용할 경우에 구조물의 재료에 따른 탄성 특성에 대해서 연구하였다. 또한 Baz 등⁽⁶⁾은 유연 보의 접착 층(bonding layer) 등이 진동제어에 미치는 영향에 대해서 연구하였다. Choi⁽⁷⁾는 압전필름을 작동기와 감지기로 동시에 사용하였고, 새로이 설계한 일정 진폭-계인 제어기를 제안하여 정상상태에서의 진동 제어 성능을 향상시켰다. 또한 고속의 유연 링크지 메카니즘에서 발생할 수 있는 진동을 억제하기 위한 제어기법을 제시하기도 하였다.⁽⁸⁾ 한편 국내에서도 압전재료를 이용한 진동제어 연구가 활발히 진행되고 있다.^(9,10)

이러한 일련의 연구 흐름은 주로 유연 구조물의 진동제어에 주안점을 두고 있지만, 이와는 반대로 압전 재료를 이용하여 구조물에 진동을 발생시킬 수도 있다. 이러한 점에 착안하여 압전재료 자체를 로봇의 소형 그리퍼로 직접 이용하여 요구되는 운동의 추적제어를 수행할 수 있다. 그러나 이 경우 압전 재료의 제한된 변위 확장 특성상 그리퍼의 작동 범위는 매우 작을 수 밖에 없다. 따라서, 이를 극복하기 위하여 압전재료와 연계된 스마트 유연 구조물 시스템을 구성하고 이를 로봇 그리퍼로써 사용할 수 있다. 이러한 메카니즘의 경우 작은 모멘트로 큰 선단 변위를 발생시킬 수 있기 때문에 로봇 그리퍼의 작동 범위를 효과적으로 확장시킬 수 있으며 또한 정밀한 추적 제어성도 유지할 수 있다.

압전재료를 작동기로 이용한 스마트 구조물 시스템

템의 위치 제어에 관한 연구는 매우 드물다. 근래에 와서 일본 등지에서 약간 이루어지고 있지만, 압전 세라믹을 작동기로 이용한 PID (proportional-integral-derivative) 제어 알고리즘에서 크게 벗어나지 못하고 있는 실정이다.⁽¹¹⁾ 그러나, 로봇 매니플레이터가 매우 유연하고 또한 그 크기가 cm나 mm 단위로 작은 경우에는 주변 환경의 공기흐름 변화라던지 혹은 충격과 같은 외란 (disturbance)에 대해 강체 로봇 매니플레이터에 비해서 상대적으로 약하다. 또한 작은 로봇이 사람의 손이 미치지 않는 판로 내에서 이물질 제거하는 일을 하는 경우 작업 도중에 제안된 로봇의 매니플레이터 자체에 이물질이 붙거나 하면 질량을 증가시켜 주요 시스템 변수인 고유진동수가 변할 수 있다. 그리고 의약용 미소 로봇인 경우 사람의 혈관 속으로 들어가면 작업 환경이 대기 상태에서 혈액으로 바뀌게 되므로 감쇠비에 영향을 미칠 수 있다. 이러한 것들은 소형 유연 로봇 매니플레이터에서 발생할 가능성이 있는 시스템 변수 요소들이다. 따라서 제어 시스템 구축시 기존의 PID 제어기와 같은 재래식 제어방법보다는 대상 제어 시스템의 변수변동(parameter variation)이나 외란에 대해 강건한 슬라이딩 모드제어기와 같은 강건제어 알고리즘이 요구된다.^(12,13)

본 연구의 목적은 압전필름을 작동기로 하는 스마트 유연 구조물을 구성하고, 강건제어기의 하나인 슬라이딩모드제어 이론을 도입하여 이 구조물의 추적 제어에 알맞도록 제어기를 구성한 후 강건 위치제어를 수행함으로써 실제 로봇 그리퍼로서의 적용 가능성을 입증함에 있다. 이를 위해 해밀톤의 법칙을 이용하여 편미분 형태의 동적 지배방정식과 경계조건을 유도하고, 제어기 설계를 위해 모드해성 방법을 이용한 에너지방정식들을 라그랑지 방정식에 대입하여 상태 공간제어 시스템을 도출하였다. 제어 시스템 모델 구성시 실제 작업 환경에서 발생할 수 있는 고유주파수 및 감쇠비의 변수변동을 고려하였다. 제어기 설계를 위하여 먼저, 임의의 초기조건에 대하여 추적오차가 영(zero)으로 가기 위한 슬라이딩 서피스를 설정하였다. 슬라이딩 모드 영역을 지배하는 운동방정식으로부터 등가 제어기를 설계한 후, 슬라이딩모드 존재조건을 이용하여 불연속 강건 제어기를 구축하였다. 그리고 제어기 실현시 발생할 수 있는 떨림현상(chattering)을 제거하기 위하여 제어기가 내포하고 있는 부호

함수를 포화함수로 대체하였다.^(14,15) 한편, 제어기 구현시 필요한 모든 상태변수는 선단 변위 신호를 이용한 완전차수 관측기(full-order observer)를 설계하여 예측하였다. 제안된 추적제어기법의 필요성과 효율성과 건강성을 입증하기 위하여 정현파 및 계단함수로 정의된 요구 선단 궤적을 설정하여 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 수행하였다.

2. 동적 모델링

본 연구에서 고려한 스마트 유연 구조물은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 복합재료 외판보의 한쪽 면에 압전필름 작동기를 부착한 형태이다.

압전필름에 전압 $V(x, t)$ 를 부가할 때 압전 필름에서 발생하는 변형률 ϵ_p 는 다음 식으로 표시된다.⁽³⁾

$$\epsilon_p(x, t) = V(x, t) \cdot \frac{d_{31}}{h_2} \quad (1)$$

여기서, d_{31} 은 압전 변형률상수(piezoelectric strain constant)이며, 이때 압전필름 변형률로 인한 외판보의 합성 변형률(resultant strain) ϵ_t 은 힘의 평형 상태에서부터 구할 수 있으며 다음과 같다.

$$\epsilon_t = \frac{E_2 h_2}{E_1 h_1 + E_2 h_2} \cdot \epsilon_p \quad (2)$$

따라서 작동기용 압전필름에 전압 $V(x, t)$ 가 가해졌을 때, 외판보의 중립축을 중심으로 균일하게 발생하는 굽힘모멘트는 다음 식으로 유도된다.

$$M = E_1 h_1 b \epsilon_t \left(\frac{h_2}{2} - D \right) - E_2 h_2 b (\epsilon_p - \epsilon_t) \left(\frac{h_2}{2} + h_1 - D \right) \quad (3)$$

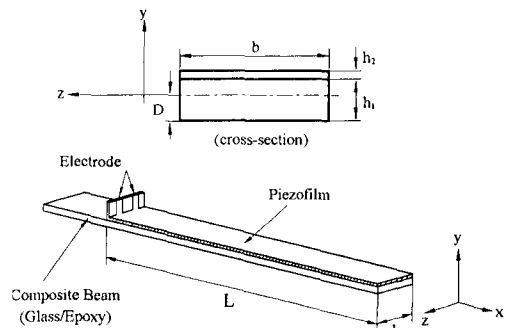


Fig. 1 Schematic diagram of a smart structure beam

여기서, D 는 밑면으로부터 중립축까지의 거리이며 다음과 같다.

$$D = \frac{E_1 h_1^2 + E_2 h_2^2 + 2h_1 h_2 E_2}{2(E_1 h_1 + E_2 h_2)} \quad (4)$$

식 (1)~(4)로부터 공급 전압 $V(x, t)$ 와 굽힘 모멘트 사이의 관계식을 유도하면 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$M = -d_{31} \left(\frac{h_1 + h_2}{2} \right) \frac{E_1 E_2 h_1 b}{(E_1 h_1 + E_2 h_2)} V(x, t) = c \cdot V(x, t) \quad (5)$$

여기서, c 는 제안된 외팔보의 물리적, 기하학적 성질과 압전필름의 성질에 의해 결정되는 상수이다. 식 (5)는 작동기용 압전필름의 영향이 모멘트의 형태로 전압에 비례하여 시스템에 작용됨을 의미하므로 전압 $V(x, t)$ 와 연계된 알맞은 제어 알고리즘을 설계하면 위치추적제어가 가능함을 제시한다.

제안된 구조물을 Bernoulli-Euler 보라고 가정 한 후 외팔보의 운동에너지 및 위치에너지를 표현하면 각각 다음과 같다. 이때 작동기의 영향은 위치에너지를 증가시키고 감소시키는 역할을 하는 것으로 고려하였다.⁽⁷⁾

$$T_k = \frac{1}{2} \int_0^L \left(\frac{\partial y(x, t)}{\partial t} \right)^2 \cdot \rho A dx \quad (6)$$

$$T_p = \frac{1}{2} \int_0^L \frac{1}{EI} \left(EI \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial x^2} + c \cdot V(x, t) \right)^2 dx \quad (7)$$

여기서, $EI (= E_1 I_1 + E_2 I_2)$ 는 유연 외팔보 전체의 유효 굽힘강성을 나타내고, 이때 I_1 과 I_2 는 각각 모재와 압전필름의 관성모멘트이다. 또한 $\rho A = \rho_1 A_1 + \rho_2 A_2$ 이며, A_1 은 복합재료의 단면적이고, A_2 는 압전필름의 단면적이다. 이러한 운동에너지와 위치 에너지를 해밀톤의 법칙에 적용하면 다음과 같은 지배방정식과 경계조건이 얻어진다.

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[EI \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial x^2} + c \cdot V(x, t) \right] + \rho A \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2} = 0 \quad (8)$$

$$y(x, t) \Big|_{x=0} = 0$$

$$\frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial x^2} \Big|_{x=0} = 0$$

$$EI \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial x^2} \Big|_{x=L} = -c \cdot V(x, t) \Big|_{x=L}$$

$$EI \frac{\partial^3 y(x, t)}{\partial x^3} \Big|_{x=L} = -c \cdot \frac{\partial V(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=L} \quad (9)$$

식 (8)과 (9)에서 전압 $V(x, t)$ 는 외팔보가 x 축에 대하여 기하학적으로 일정한 형태를 갖고 있는 경우에 시간 t 만의 함수인 $V(t)$ 로 간주될 수 있다.

편미분 형태의 지배방정식 (8)은 무한개의 진동 모드를 내포하고 있으나 제어기 설계를 위해 유한개의 진동모드로 구성된 상태방정식으로 표현된다. 이를 위해 모드해석법을 도입하면 변위 $y(x, t)$ 를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$y(x, t) = \sum_{i=1}^n \Phi_i(x) \cdot q_i(t) \quad (10)$$

여기서, n 은 주요 작동 진동모드수를 나타내며, $q_i(t)$ 는 일반화 모달좌표(generalized modal coordinate)이고, $\Phi_i(x)$ 는 모드형상함수이다. 공간 변수 x 만의 함수인 $\Phi_i(x)$ 는 경계조건 (9)를 적용하면 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \Phi_i(x) &= \cosh \beta_i x - \cos \beta_i x - \frac{\sinh \beta_i L - \sin \beta_i L}{\cosh \beta_i L + \cos \beta_i L} \\ &\quad \times (\sinh \beta_i x - \sin \beta_i x) \end{aligned} \quad (11)$$

이때 β_i 는 $\beta_i^4 = \rho A \omega_i^2 / EI$ 를 만족하는 상수이며, ω_i 는 외팔보의 고유진동수이다.

모드 해석을 이용해서 구한 운동에너지와 위치에너지를 라그랑지 방정식에 대입하고, 비례 감쇠항을 첨가하면 다음과 같은 비연계 상미분방정식이 유도된다.

$$\ddot{q}_i + 2\zeta_i \omega_i \dot{q}_i + \omega_i^2 q_i = -\frac{c \cdot V(t)}{I_i} \int_0^L \frac{\partial^2 \Phi_i}{\partial x^2} dx \quad (12)$$

여기서, ζ_i 는 각 모드의 감쇠비(damping ratio)이고, I_i 는 일반화 질량(generalized mass)으로 다음과 같다.

$$I_i = \int_0^L \Phi_i^2(x) \rho A dx \quad (13)$$

3. 제어기 설계

앞 절에서 유도된 상미분 방정식 (12)에 실제 환경에서 발생할 수 있는 외란을 첨가하면 다음과 같

은 상태공간제어 시스템 모델을 구성할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}V(t) + \mathbf{D}f(t) \\ \mathbf{y}(t) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(t) \end{aligned} \quad (14)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= [q_1 \ \dot{q}_1 \ q_2 \ \dot{q}_2 \ \cdots \ q_n \ \dot{q}_n]^T \quad (15) \\ \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & & & \\ -\omega_1^2 & -2\zeta_1\omega_1 & & & \\ & & \ddots & & \\ & & & 0 & 1 \\ & & & -\omega_n^2 & -2\zeta_n\omega_n \end{bmatrix} \\ \mathbf{B} &= c \left[0 \ \frac{1}{I_1} \int_0^L \frac{\partial^2 \Phi_1}{\partial x^2} dx \ \cdots \ 0 \ \frac{1}{I_n} \int_0^L \frac{\partial^2 \Phi_n}{\partial x^2} dx \right]^T \\ \mathbf{C} &= [\Phi_1(L) \ 0 \ \cdots \ \Phi_n(L) \ 0] \\ \mathbf{D} &= [0 \ d_1 \ \cdots \ 0 \ d_n]^T \end{aligned} \quad (16)$$

식 (14)에서 $f(t)$ 는 미지의 값으로 시스템의 외부 환경과 하드웨어의 외란을 나타내며, 그 크기가 한정되어 있다고 가정한다. 그리고 출력행렬 \mathbf{C} 는 선단 위치 감지기로부터의 정보를 나타낸다.

외판보의 선단 위치에 대한 추적제어를 수행하기 위해서 제어기는 선단위치의 임의의 초기조건으로부터 선단 추적오차를 영(zero)으로 보내야 하므로 다음과 같이 추적오차를 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} e(t) &= y_t - y_{dt} \\ &= \sum_{i=1}^n \Phi_i(L) x_i(t) - y_{dt} \\ \dot{e}(t) &= \dot{y}_t - \dot{y}_{dt} \\ &= \sum_{i=1}^n \Phi_i(L) \dot{x}_i(t) - \dot{y}_{dt}, \quad i=1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (17)$$

시스템 (14)에서 압전필름에 가해지는 제어입력이 전압 하나이므로 다음과 같은 단일 슬라이딩 서피스를 설정한다.

$$\begin{aligned} s &= ge(t) + \dot{e}(t) \\ &= g \left[\sum_{i=1}^n \Phi_i(L) x_i(t) - y_{dt} \right] \\ &\quad + \left[\sum_{i=1}^n \Phi_i(L) \dot{x}_i(t) - \dot{y}_{dt} \right], \quad g > 0 \end{aligned} \quad (18)$$

따라서, 알맞은 제어기를 사용하여 오차상태 공간에서 임의의 위치에 있는 RP(representative point)를 식 (18)로 정의된 안정한 슬라이딩 서피스로 보낼 수 있다면 성공적인 추적제어가 수행될 수 있음을 알 수 있다. 이렇게 실제 원하는 위치에

대한 추적제어를 보장하기 위해서는 다음과 같은 슬라이딩모드 존재조건을 만족해야 한다.

$$s\dot{s} < 0 \quad (19)$$

상기 조건을 만족하는 제어기 설계를 위해 먼저 s 의 시간에 대한 미분치를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{s} &= g \left(\sum_{i=1}^n \Phi_i(L) \dot{x}_i - \dot{y}_{dt} \right) + \left(\sum_{i=1}^n \Phi_i(L) \ddot{x}_i - \ddot{y}_{dt} \right) \\ &= g \left(\sum_{i=1}^n \Phi_i(L) \dot{x}_i - \dot{y}_{dt} \right) + \left[\sum_{i=1}^n \Phi_i(L) (-\omega_i^2 x_i \right. \\ &\quad \left. - 2\zeta_i \omega_i \dot{x}_i + d_i f(t)) - \ddot{y}_{dt} \right] + PV(t) \end{aligned} \quad (20)$$

여기서,

$$P = -c \sum_{i=1}^n \frac{\Phi_i(L)}{I_i} \int_0^L \frac{\partial^2 \Phi_i}{\partial x^2} dx$$

따라서 슬라이딩모드 존재조건 (19)를 만족시키는 불연속 제어기 $V(t)$ 를 다음과 같이 설계할 수 있다.

$$\begin{aligned} V(t) &= -\frac{1}{P} \left\{ g \left[\sum_{i=1}^n \Phi_i(L) \dot{x}_i - \dot{y}_{dt} \right] \right. \\ &\quad \left. + \left[\sum_{i=1}^n \Phi_i(L) (-\omega_i^2 x_i - 2\zeta_i \omega_i \dot{x}_i) - \ddot{y}_{dt} \right] \right. \\ &\quad \left. + k \operatorname{sgn}(s) \right\} \end{aligned} \quad (21)$$

여기서,

$$k > \sum_{i=1}^n \Phi_i(L) d_i |f(t)|$$

상기 식에서 k 는 부호함수와 연계된 불연속 제어 이득이다. 실제적인 제어기 구현에 있어서 불연속 제어기 (21)은 떨림현상을 발생시켜 유연 구조물의 정확한 위치 제어에 바람직하지 못하므로 이 문제를 해결하기 위해서 정해진 경계영역 두께(ϵ) 안에서 불연속 제어기를 연속 제어기로 근사화할 수 있다. 즉, 식 (21)의 비선형 함수인 부호함수를 다음과 같은 포화함수로 대체하여 연속 제어기로 사용할 수 있다.

$$\operatorname{sat}(s) = \begin{cases} -\frac{s}{\epsilon}, & |s| \leq \epsilon \\ \operatorname{sgn}(s), & |s| > \epsilon \end{cases} \quad (22)$$

제한된 제어기 (21)은 시스템의 모델 불확실성이 존재하지 않는다는 가정하에 설계된 것이다. 그러나, 유연한 구조물의 시스템 모델링과정에서 필요한 가정으로부터 야기될 수 있는 모델변수의 불확실성과, 운전시 미지의 선단질량에 의한 시스템 변수 변동이 존재할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는

시스템의 고유진동수와 감쇠비에 다음과 같은 변수 변동을 부가하였다.

$$\begin{aligned} \omega_i &= \omega_{0,i} + \delta\omega_i, & |\delta\omega_i| &\leq \beta_i \omega_{0,i} \\ \zeta_i &= \zeta_{0,i} + \delta\zeta_i, & |\delta\zeta_i| &\leq \gamma_i \zeta_{0,i} \end{aligned} \quad (23)$$

여기서, $\omega_{0,i}$ 및 $\zeta_{0,i}$ 는 각각 알고 있는 i 번째 모드의 시스템 고유진동수 및 감쇠비의 공칭값(nominal value)을 나타내며, $\delta\omega_i$ 및 $\delta\zeta_i$ 는 이에 상응하는 변수변동을 나타낸다. 이 변동의 크기는 가중치 β_i 와 γ_i 에 따라 좌우되며 일반적으로 실제 시스템에서 발생할 수 있는 변수변동의 한계를 취한다. 따라서 식 (14)의 시스템 행렬 \mathbf{A} 를 공칭부 \mathbf{A}_0 와 불확실성부 $\mathbf{\Delta A}$ 로 나누어 다음과 같은 제어 시스템 모델을 설정할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= (\mathbf{A}_0 + \mathbf{\Delta A})\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}V(t) + \mathbf{D}f(t) \\ \mathbf{y}(t) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(t) \end{aligned} \quad (24)$$

여기서, 행렬 \mathbf{A}_0 및 $\mathbf{\Delta A}$ 의 성분은 식 (23)을 식 (16)의 행렬 \mathbf{A} 에 대입하여 쉽게 얻을 수 있다.

시스템 불확실성이 내포된 제어 시스템 (24)에 대한 슬라이딩모드제어기를 설계하기 위해서 먼저 슬라이딩 서피스의 시간에 대한 미분치를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{s} &= g \left[\sum_{i=1}^n \Phi_i(L) \dot{x}_i - \dot{y}_{at} \right] \\ &+ \left[\sum_{i=1}^n \Phi_i(L) [(r_{2i-1} + p_{2i-1})x_i \right. \\ &\left. + (r_{2i} + p_{2i})\dot{x}_i + d_i f(t)] - \dot{y}_{at} \right] + PV(t) \end{aligned} \quad (25)$$

여기서,

$$\begin{aligned} r_{2i-1} &= -\omega_{0,i}^2, & r_{2i} &= -2\zeta_{0,i}\omega_{0,i} \\ p_{2i-1} &= -(2\omega_{0,i}\delta\omega_i + \delta\omega_i^2) \\ p_{2i} &= -2(\omega_{0,i}\delta\zeta_i + \zeta_{0,i}\delta\omega_i + \delta\omega_i\delta\zeta_i) \end{aligned}$$

따라서 슬라이딩모드 존재조건 (19)를 만족하는 제어기를 다음과 같이 제안할 수 있다.

$$\begin{aligned} V(t) &= -\frac{1}{P} \left\{ g \left[\sum_{i=1}^n \Phi_i(L) \dot{x}_i - \dot{y}_{at} \right] \right. \\ &+ \left[\sum_{i=1}^n \Phi_i(L) (r_{2i-1}x_i + r_{2i}\dot{x}_i) - \dot{y}_{at} \right] \\ &+ \left[k + \left| \sum_{i=1}^n \Phi_i(L) (z_{2i-1}x_i + z_{2i}\dot{x}_i) \right| \right] \\ &\left. \operatorname{sgn}(s) \right\} \end{aligned} \quad (26)$$

여기서,

$$\begin{aligned} z_{2i-1} &= -(2\omega_{0,i}\beta_i\omega_{0,i} + \beta_i^2\omega_{0,i}^2) \\ z_{2i} &= -2(\gamma_i\zeta_{0,i}\omega_{0,i} + \beta_i\omega_{0,i}\zeta_{0,i} + \gamma_i\beta_i\omega_{0,i}\zeta_{0,i}) \\ k &> \sum_{i=1}^n \Phi_i(L) |d_i| |f(t)| \end{aligned}$$

제안된 제어기 식 (26)을 이용하여 슬라이딩모드 존재조건 (19)가 만족함을 다음과 같이 증명할 수 있다.

$$\begin{aligned} s\dot{s} &= s \left\{ g \left[\sum_{i=1}^n \Phi_i(L) \dot{x}_i - \dot{y}_{at} \right] \right. \\ &+ \left[\sum_{i=1}^n \Phi_i(L) [(r_{2i-1} + p_{2i-1})x_i \right. \\ &\left. + (r_{2i} + p_{2i})\dot{x}_i + d_i f(t)] - \dot{y}_{at} \right] \\ &+ PV(t) \left. \right\} \\ &= s \left\{ \sum_{i=1}^n \Phi_i(L) [p_{2i-1}x_i + p_{2i}\dot{x}_i + d_i f(t)] \right. \\ &\left. - \left[k + \left| \sum_{i=1}^n \Phi_i(L) (z_{2i-1}x_i + z_{2i}\dot{x}_i) \right| \right] \right. \\ &\left. \operatorname{sgn}(s) \right\} < 0 \end{aligned} \quad (27)$$

상기 제어기에서 제안된 상태변수들은 실제 실험 시 제한된 측정장비로 인하여 모두 알 수는 없다. 따라서 주어진 시스템의 \mathbf{A}_0 , \mathbf{B} , \mathbf{C} 행렬을 이용한 관측기를 설계하여 상태 변수들을 예측할 수 있다. 이를 위해 본 연구에서는 입력전압과 구조물 선단 위치에 대한 정보를 이용하여, 다음과 같은 완전 차수 관측기를 구성하였다.⁽¹⁶⁾

$$\begin{aligned} \dot{\bar{\mathbf{x}}}(t) &= (\mathbf{A}_0 - \mathbf{R}\mathbf{C})\bar{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{R}\mathbf{y}_t + \mathbf{B}V(t) \\ \mathbf{R} &= [r_1 \ r_2 \ \dots \ r_{2n-1} \ r_{2n}]^T \end{aligned} \quad (28)$$

여기서, $[\mathbf{A}_0 - \mathbf{R}\mathbf{C}]$ 행렬의 요구고유치 실수부가 음의 값을 갖도록 관측기 행렬 \mathbf{R} 을 설정해야 한다.

4. 추적제어 결과 및 고찰

본 연구에서 제안된 외팔보를 구성하는 소재는 압전재료와의 절연효과를 위해 복합재료(glass/epoxy)를 사용하였고, 그 재료상수와 압전필름의 성질 및 재원은 Table 1과 같다. 이때 사용된 압전필름의 단위길이당 무게는 0.0047 kg/m로 전체 외팔보 구조물의 약 14%에 해당한다.

복합재료의 상면에 부착된 압전필름을 작동기로 사용하고 비접촉식 변위 감지기(proximito)를 이용하여 연속적 귀환제어 시스템을 구성하였다. 비접촉식 변위감지기를 사용하여 외팔보 끝 단에서 측정된 변위신호는 A/D 변환기를 통하여 디지털 신호로 변환되어 마이크로 프로세서로 보내어진다.

Table 1 Dimensional and mechanical properties of the composite beam and piezofilm

Composite beam(glass/epoxy)				
Young's modulus(E_1)	Thickness(h_1)	Density(ρ_1)	Width(b)	Length(L)
6.4 GPa	0.5 mm	1865 kg/m ³	27.0 mm	170.0 mm
Piezofilm(PVDF)				
Young's modulus(E_2)	Thickness(h_2)	Density(ρ_2)	Width(b)	Length(L)
2 GPa	0.110 mm	1780 kg/m ³	27.0 mm	170.0 mm
Piezoelectric strain constant(d_{31})			$23 \times 10^{-12} \frac{m}{mV}$	

이때 사용된 변환기의 샘플링속도는 1000 samples/sec로 설정하여 실험을 수행하였다. 변위 감지기로 부터 얻은 구조물 선단의 위치성분과 제어입력의 정보를 이용하여 설계된 관측기로부터 상태변수를 계산한다. 이러한 상태변수 값을 이용하여 슬라이딩 서피스를 구성하고, 추적제어 알고리즘으로부터 알맞은 제어입력이 결정된다. 물론 제어 입력은 미리 컴퓨터에 설정된 미분가능한 요구 추적함수에 따라 영향을 받는다. 마이크로 컴퓨터에서 생성된 제어입력 전압은 D/A 변환기를 거쳐서 1000배 DC 전압 증폭기(voltage amplifier)를 통해 증폭되어 압전필름에 공급된다. 이 공급 전압은 제어모멘트를 생성하며 이로부터 원하는 추적제어가 실현된다. 한편, 실험결과를 저장하고 분석하기 위해 신호분석기(FFT analyzer)를 이용하였다. 이러한 추적위치제어를 위한 전체 실험장치는 Fig. 2에 나타

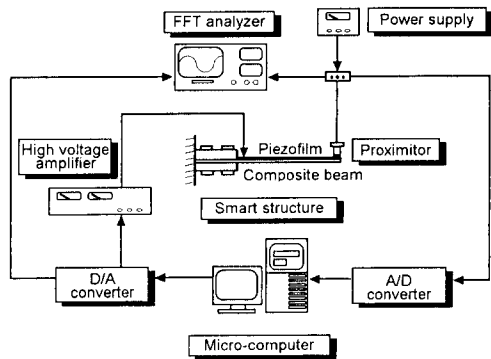
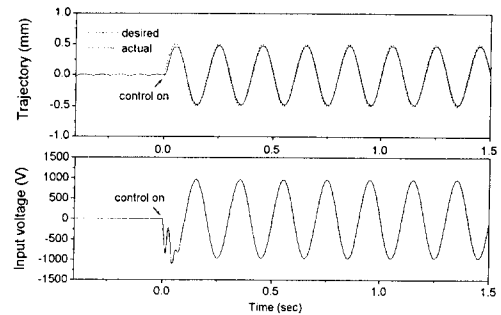


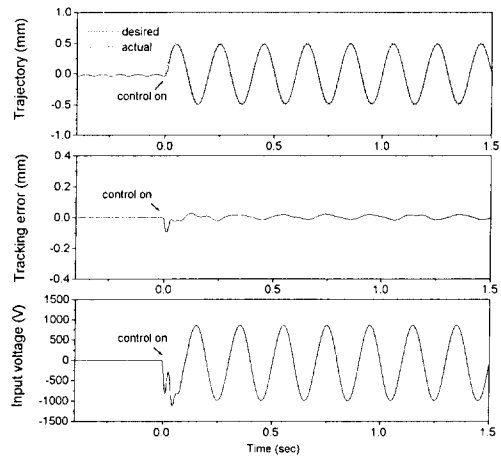
Fig. 2 Experimental apparatus for position tracking control

내었다.

Fig. 3은 위치추적제어시 가장 많이 도입되는 정현파(sine wave)형태의 함수를 추적하는 경우의 제



(a) Simulation result



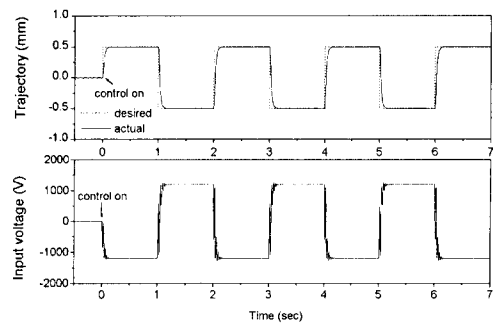
(b) Experiment result

Fig. 3 Tracking performance for sinusoidal function

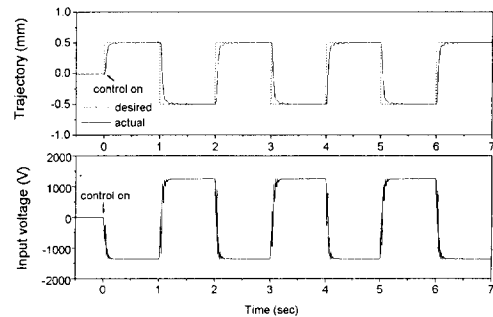
어 성능을 나타낸다. 이때 소형 유연 로봇 매니퓰레이터의 그리핑 작업에서는 2차 모드 이하의 저주파수 영역에서 주로 작업하기 때문에 1차, 2차 모드만으로도 모델링하여도 충분하다. 따라서, 실험과 시뮬레이션에 사용된 작동모드는 제1차 및 2차 진동모드이며, 이에 대한 모델변수 값은 $\omega_1=12$ Hz, $\omega_2=76.3$ Hz, $\zeta_1=0.0072$, $\zeta_2=0.00432$ 이다. 이러한 값들은 압전필름이 부착된 외팔보를 랜덤(random)상태에서 가진시켜 구한 전달함수로부터 실험적으로 구하였다. 한편 이론적 모델로부터 구한 진동방정식을 이용하여 구한 고유진동수는 $\omega_1=11.68$ Hz, $\omega_2=73.22$ Hz로서 실험에서 구한 값들과 크게 다르지 않음을 볼 수 있었다. 제안된 시스템의 외란에 대한 강건성을 입증하기 위해 $df(t)=0.1\sin(120\pi t)$, $d^2f(t)=0.005\sin(120\pi t)$ 형태의 외란을 시뮬레이션과 실험에 모두 부가하였다. 이때 외란 $f(t)$ 를 60 Hz 주기로 두 모드에 부가하였는데 이는 감지거나 다른 여러 가지 실험장비에서 발생하는 외란을 주로 하여 고려하였다. 이러한 외란의 크기와 주기는 실제 실험 환경을 고려하여 얻은 값으로 Fig. 3(b)의 초기 부근에서와 같이 제어하기 전에 나타나 있다. 실험과 시뮬레이션에 사용된 슬라이딩 서피스의 기율기와 포화함수의 경계영역 두께 그리고 불연속 제어이득은 각각 $g=100$, $\epsilon=0.3$, $k=15$ 의 값을 사용하였으며, 완전차수 관측기 설계시 사용되는 요구고유치는 $-5.0 \pm 75i$, $-5.0 \pm 480i$ 로 설정하였다. 한편, 이때 사용된 추적 제어기는 시스템에 모델변수 변동요소를 부가하지 않았기 때문에 제어기(21)을 사용하였다. 1.5초 동안의 추적제어 결과를 보면 요구선단 위치에 대한 오차의 크기는 약 0.1초 후에 거의 영(zero)으로 도달하였다. 그러나, 제안된 제어기는 포화함수를 포함하고 있기 때문에 측정된 오차 궤적에서 알 수 있듯이 요구 궤적의 정점 부근에서 약 0.2 mm 정도의 작은 오차가 불가피하게 발생하였다. 물론, 이 오차의 크기는 포화함수의 경계영역 두께를 좁히면 감소하지만, 경계영역 두께의 감소는 제어입력의 떨림을 발생시키기 때문에 정밀한 추적제어를 수행하기 어렵게 만들 수도 있다. 그리고, 추적제어 결과를 위한 제어 입력 궤적에서 볼 수 있듯이 사용된 압전 필름의 특정 최대 허용전압(사용된 압전필름은 경우 3300 V임)내에서 떨림현상이 부드러운 전압이 공급된 것을 알 수 있다. 전반적으로 볼 때, 정현파에 대한 추적제

어 결과는 매우 우수하게 이루어지는 것을 알 수 있으며, 실험과 시뮬레이션 결과도 양호하게 일치하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 4는 실제 로봇 그리퍼 등에서 많이 요구되는 운동으로 주기가 0.5 Hz인 계단(step)함수에 대한 추적제어 결과이다. 모든 시뮬레이션과 실험 조건은 Fig. 3의 정현파 추적경우와 같으나 포화함수의 경계영역 두께 값은 0.25로 사용하였다. 7초 동안의 제어입력 결과를 보면 매초마다 선단 변위가 양(+), 혹은 음(-)으로 변할 때 제어입력의 떨림현상이 조금 존재하나 압전필름의 빠른 반응성에 의해 잘 응답하였다. 선단 변위의 추적 제어 결과를 보면 매초마다 갑작스러운 요구 추적함수의 변화에 대한 오차가 발생한 것을 볼 수 있다. 그러나 오버슈트(overshoot)현상은 발생되지 않았으며, 정착에 필요한 시간은 약 0.2초로서 비교적 빠른 추적제어가 이루어짐을 알 수 있다. 이때 슬라이딩 서피스의 기율기 값을 증가시키면 보다 빨리 정착이 일어나지만 제어입력이 증가하기 때문에 압전재료에 무리가 가지 않는 값을 선택하여 사용해야 한다. 계단함수에 대한 추적제어에서도 실험과 시뮬



(a) Simulation result



(b) Experiment result

Fig. 4 Tracking performance for step function

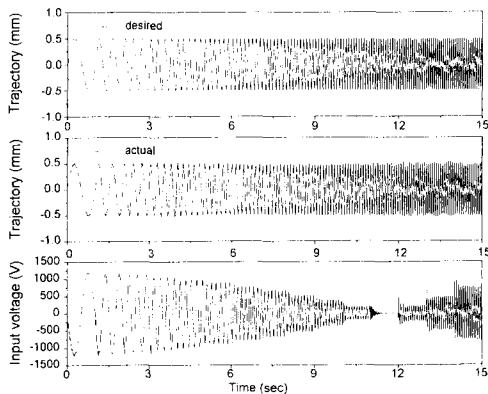
레이션 결과가 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 그리고 이러한 추적제어 성능은 응답성과 정밀성 측면에서 볼 때 로봇 그리퍼 등의 정밀한 위치제어에 적용될 수 있는 높은 가능성을 제공한다.

Fig. 5는 진동수가 1 Hz로부터 시작해서 1초마다 1 Hz씩 증가하는 정현파를 추적하는 경우의 실험 및 시뮬레이션 결과이다. 이렇게 주파수가 변화하는 추적 궤적을 설정한 이유는 제어 시스템의 강건성과 빠른 응답성을 고찰하는데 있으며, 나아가서 각 해당 주파수에 대한 제어입력의 크기를 알아보는 목적도 있다. 시스템 모델 불확실성을 고려하기 위하여 주요변수인 고유진동수에 $\beta_1=4\%$ (12 ± 0.48 Hz), $\beta_2=1\%$ (76.3 ± 0.763 Hz)와 감쇠비에 $\gamma_1=10\%$ (0.0072 ± 0.00072), $\gamma_2=5\%$ (0.00432 ± 0.000216)를 각각 부가하였다. 이러한 불확실량은 실제 여러번 주요 변수들을 측정하는

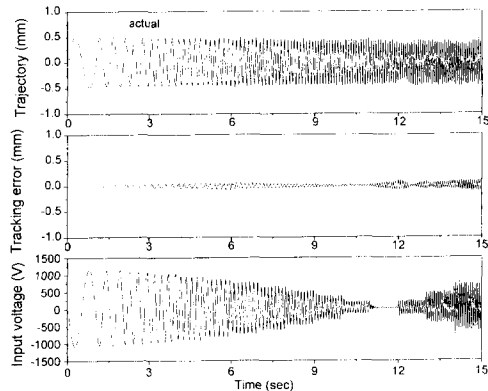
과정에서 오차의 수치가 각 모드마다 다른 크기로 관찰되었기 때문에 다른 비율로 적용하였다. 따라서, 이 경우에는 외란과 변수변동에 강건하도록 설계된 제이키 (26)을 사용하였다. 또한 관측기의 요구고유치는 $-1.0 \pm 75.4i$, $-1.0 \pm 479.3i$ 로 설정하였다. 이러한 값들은 최적의 추적성능을 보이기 위해서 시행착오법으로 구한 결과치이다. 실험 결과의 오차 궤적에서 보면 제1차 고유진동수(12 Hz) 이하에서는 양호한 추적제어 결과를 보이다가 고유진동수 부근에서 진동모드의 변화로 인한 떨림 현상으로 약간의 성능 저하가 발생하는 것을 알 수 있다. 또한 제안된 구조물의 고유진동수를 넘어서는 고주파수 영역에서부터 위상차가 발생하여 오차 궤적이 증가하나 진폭에 대한 추적제어는 양호하게 이루어지는 것을 볼 수 있다. 한편, 15초 동안의 제어전압 궤적을 보면 시스템의 제1차 고유진동수에 접근할수록 제어입력 전압이 감소하여 1차 고유진동수 부근에서 최소값을 보이다가 이후 다시 증가하는 것을 볼 수 있다. 물론 이는 시스템의 고유진동수 부근에서 적은 힘(혹은 모멘트)으로 큰 가진을 얻을 수 있기 때문이다.

5. 결론

소형 스마트 유연 구조물의 위치추적제어를 위해 압전필름 작동기를 사용하였고 이와 연결된 슬라이딩모드제어기를 구성하였다. 이 때 관측기를 함께 구성하여 제어기에 필요한 모든 상태변수들을 예측하여 사용하였다. 제안된 제어 알고리즘의 실험적 구현 결과 정현파형, 계단형 그리고 주파수가 변화하는 요구선단 궤적을 우수하게 추적함이 입증되었다. 이러한 추적제어 효과의 우수성은 정밀성 및 변수변동이나 외란에 대한 강건성 등으로 설명된다. 빠른 반응속도를 갖는 압전필름은 비교적 넓은 주파수의 추적함수까지 잘 추적하였고, 불연속적인 제어입력에도 잘 응답하였다. 그러나 제안된 압전필름이 발생시킬 수 있는 제어력은 제한되어 있기 때문에 소형 유연 로봇의 그리퍼에 부착하여 추적제어를 수행할 때 큰 작동 범위를 얻기 어려울 것으로 예측된다. 따라서 향후 비교적 큰 제어력을 발생시킬 수 있는 압전 세라믹을 이용하여 소형 유연 로봇의 그리퍼를 직접 구성하고, 실제 작업환경에서 그리퍼가 요구하는 위치 및 힘에 대하여 슬라이딩모드제어기를 이용한 추적제어를 수행함으로써



(a) Simulation result



(b) Experiment result

Fig. 5 Tracking performance for sinusoidal function of varying frequency

보다 실제 시스템 적용에 근접한 연구가 계속적으로 수행되어야 할 것이다.

후 기

본 연구의 일부는 1995년도 한국과학재단의 핵심 전문연구과제(951-1008-068 1)로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Choi, S. B., Park, Y. K. and Suh, M. S., 1994, "Elastodynamic Characteristics of Hollow Cantilever Beams Containing an Electro-Rheological Fluid: Experimental Results," *AIAA Journal*, Vol. 32, No. 2, pp. 438~440.
- (2) Rogers, C. A., 1990, "Active Vibration and Structural Acoustic Control of Shape Memory Alloy Hybrid Composites: Experimental Results," *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 88, No. 6, pp. 2803~2811.
- (3) Bailey, T. and Hubbard, J. E., Jr., 1985, "Distributed Piezoelectric-Polymer Active Vibration Control of a Cantilever Beam," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 8, No. 5, pp. 605~611.
- (4) Tzou, H. S., 1991, "Distributed Modal Identification and Vibration Control of Continua: Theory and Applications," *ASME J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 113, pp. 494~499.
- (5) Crawley, E. F., Javier de Luis, 1987, "Use of Piezoelectric Actuators as Elements of Intelligent Structures," *AIAA Journal*, Vol. 25, No. 10, pp. 1373~1385.
- (6) Baz, A. and Poh, S., 1988, "Performance of an Active Control System with Piezoelectric Actuators," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 126, No. 2, pp. 327~343.
- (7) Choi, S. B., 1995, "Alleviation of Chattering in a Flexible Beam Control via Piezofilm Actuator and Sensor," *AIAA Journal*, Vol. 33, No. 3, pp. 564~567.
- (8) Choi, S. B., Cheong, C. C., Thompson, B. S. and Gandhi, M. V., 1994, "Vibration Control of Flexible Linkage Mechanisms Using Piezoelectric Films," *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 29, No. 4, pp. 535~546.
- (9) 최승복, 1995, "슬라이딩모드와 압전필름 작동기를 이용한 단일링크 유연 매니퓰레이터의 강건 위치제어," 대한기계학회논문집, 제19권, 제6호, pp. 1371~1381.
- (10) 윤광준, 이영재, 김현수, 1993, "압전 폴리머 센서와 압전 세라믹 작동기를 이용한 복합 재료 외관보의 능동 진동 억제," 한국항공우주학회 춘계학술대회논문집, pp. 61~64.
- (11) Jiang, Z. W., Chonan, S. and Tani, J., 1992, "Tracking Control of a Miniature Flexible Arm Using Piezoelectric Bimorph Cells," *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 11, No. 3, pp. 260~267.
- (12) 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.
- (13) Utkin, V. I., 1977, "Variable Structure Systems with Sliding Modes," *IEEE Trans. on Automatic Control*, Vol. AC-22, No. 2, pp. 212~222.
- (14) 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.
- (15) Slotine, J. J. E. and Sastry, S. S., 1983, "Tracking Control of Nonlinear Systems Using Sliding Surfaces with Application to Robot Manipulators," *International Journal of Control*, Vol. 38, No. 2, pp. 465~492.
- (16) Chen, C. T., 1984, "Linear System Theory and Design," *CBS College Publishing*, pp. 351~361.