論文 한국정밀공학회지 제14권 제1호 (1997년 1월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 14. No.1. JANUARY. 1997.

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

압전 세라믹 작동기로 구성된 스마트 유연 그리퍼의 힘 추적 제어

최 승 복*, 정 재 천*, 이 철 희**

Force Tracking Control of a Smart Flexible Gripper Featuring Piezoceramic Actuators

Seung-Bok Choi*, Chae-Cheon Cheong*, Chul-Hee Lee**

ABSTRACT

This paper presents a robust force tracking control of a smart flexible gripper featured by a piezoceramic actuator characterizing its durability and quick response time. A mathematical governing equation for the proposed gripper 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 the system uncertainties is adopted to design a force tracking controller for the piezoceramic actuator. Using output information from the tip force sensor, a full-order observer is constructed to estimate state variables of the system. Force tracking performances for desired trajectories represented by sinusoidal and step functions are evaluated by undertaking both simulation and experimental works. In addition, in order to illustrate practical feasibility of the proposed method, a two-fingered gripper is constructed and its performance is demonstrated by showing a capability of holding an object.

Key Words : Smart Flexible Gripper (스마트유연그리퍼), Force Tracking Control (힘추적제어), Piezoceramic Actuator (압전세라믹작동기), Sliding Mode Control (슬라이딩모드제어), Robust Control (강건제어)

* 정회원, 인하대학교 기계공학과
** 현대자동차(주)

기 호 설 명

$\boldsymbol{A}$: 시스템 행렬
$\boldsymbol{B}$: 제어 입력 행렬
$\boldsymbol{C}$: 출력 행렬
d_i : 각 모드에 대한 외란의 크기
d_{31} : 압전 변형률 상수
$\boldsymbol{D}$: 외란 행렬
e : 선단 힘 추적 오차
E_c : 복합 재료 모재의 탄성 계수
E_p : 압전 세라믹의 탄성 계수
f : 외란
F_{dt} : 그리퍼의 요구 선단 힘
F_t : 그리퍼의 선단 힘
g : 슬라이딩 서피스의 기울기
h_c : 복합 재료 모재의 두께
h_p : 압전 세라믹의 두께
I_i : 일반화 질량
k : 불연속 제어 이득
K_s : 스프링 상수
l_1 : 압전 세라믹의 길이
L : 그리퍼 전체의 길이
q_i : 일반화 모달 좌표
$\boldsymbol{R}$: 관측기 게인
s : 슬라이딩 서피스
T_k : 운동 에너지
V : 제어 입력 전압
V_p : 위치 에너지
w : 복합재료 모재(혹은 압전세라믹)의 폭
x_i : 상태 변수
$\bar{x}_i$: 관측 상태 변수
β_i : 고유진동수 변화의 가중치
γ_i : 감쇠비 변화의 가중치
ε : 슬라이딩 서피스의 경계 영역 두께
ζ_i : 감쇠비
ρ_c : 복합 재료 모재의 밀도
ρ_p : 압전 세라믹의 밀도
$\Phi_i^{(i)}$: 모드 형상 함수
ω_i : 고유 진동수

1. 서론

로봇, 우주 구조물 그리고 각종 산업 기기와 같은 연구 분야에서 미소하고 정밀한 작업을 수행하기 위해 소형 유연 매니퓰레이터(manipulator)나 그리퍼(gripper)의 위치 및 힘 제어에 관한 많은 연구와 노력이 진행되어오고 있다. 이러한 작업은 반도체 산업 분야에서 작은 물체를 다루거나 혹은 화학 분야에서 미세한 관찰을 위하여 샘플을 준비하는 일 등이 해당된다. 그러나, 로봇 그리퍼를 산업 분야와 우주 등의 복잡한 작업이나 조립 작업에 적용하기 위해서는 그들의 작업 환경에서 발생할 수 있는 불확실성이나 외란에 강건한 제어 수행이 요구된다. 고정밀도 및 높은 강건성을 성취하기 위해서는 비교적 크기가 큰 재래식 작동기(전기 모터 혹은 유압 서보메카니즘)보다는 작동 메카니즘이 간단하고 소형의 새로운 작동기의 도입이 불가피하다. 최근 이러한 목적을 달성하기 위한 일환으로 소위 스마트(smart) 또는 지능(intelligent) 재료를 작동기로 사용한 연구가 진행되고 있다. 지금까지 알려진 지능 재료 매체로는 전기 유동 유체(electro-rheological fluids)[1], 형상 기억 합금(shape memory alloys : SMA)[2] 그리고 압전 재료(piezoelectric materials)[3]-[10] 등이 있다. 이중에서 압전 재료는 자중에 비해 비교적 큰 힘을 발생시키고 공급된 전압에 대해 빠르게 반응하는 특징이 있다. 압전 재료는 압력이 가해지면 전압이 발생하기 때문에 감지기로 사용할 수 있으며, 또한 전압을 가하면 변형이 발생되는 성질을 이용하여 작동기로 사용할 수도 있다. 현재 상용화되어 있는 압전 재료로는 lead zirconate titanates(PZT)와 같은 압전 세라믹과, polyvinylidene fluorides(PVDF)와 같은 압전 필름이 있다. 일반적으로 압전 세라믹은 높은 강성을 이용한 작동기로 사용되며, 압전 필름은 높은 민감도와 유연성을 이용한 센서로 사용되고 있다.

압전 재료와 연계된 연구는 1985년에 Bailey와 Hubbard[3] 등이 외팔보의 양쪽면에 압전 필름을 붙여 진동을 제어한 것을 시작으로 Tzou[4], Crawley 등[5], Baz 등[6] 그리고 Choi 등[7][8] 등에 의해서 많은 연구가 진행되어 오고 있다. 이러한 일련의 연구 흐름은 주로 유연 구조물의 진동 제어에 주안점을 두고 있지만 이와는 반대로 압전 재료를 이용하여 구조물에 진동을 발생 시킬 수도 있다. 이러한 점에 착안하여 압전 재료 자체를 로봇의 소형 그리퍼로 직접 이용하여 요구되는 운동의 추적 제어를 수행할 수 있다. 그러나 이 경우 압전 재료의 제한된 변위

확장 특성상 그리퍼의 작동 범위는 매우 작을 수 밖에 없다. 그러므로 이를 극복하기 위하여 압전 재료와 연계된 스마트 유연 구조물 시스템을 구성하고 이를 로봇 그리퍼로써 사용할 수 있다. 본 연구에서는 이를 스마트 유연 그리퍼(smart flexible gripper)로 칭한다. 이러한 메커니즘의 경우 작은 모멘트로 큰 선단 변위를 발생 시킬 수 있기 때문에 로봇 그리퍼의 작동 범위를 효과적으로 확장시킬 수 있으며, 또한 정밀한 추적 제어성능도 꾀할 수 있다.

압전 재료를 이용한 유연 구조물의 추적 제어에 관한 연구는 Jiang등[9] 이 압전 세라믹 작동기로 PID(proportional-integral-derivative) 제어 알고리즘과 연계된 유연 구조물의 위치 추적 제어에 관한 연구를 수행한 바 있다. 또한, SMA작동기를 이용한 유연구조물의 위치 추적제어에 관한 연구도 수행되었다.[10] 이 연구에서는 슬라이딩모드 제어기를 사용하여 저주파수의 비교적 큰 끝단위치(tip position)에 대한 추적제어를 실시하였으며, 시스템의 변수변동은 고려되지 않았다. 그러나, 로봇 그리퍼로써 실제 작업 분야에 사용되기 위해서는 힘 제어에 관한 연구가 반드시 수반되어야 한다. 이러한 힘 제어에 관한 연구는 드물게 이루어지고 있으며, 압전 세라믹을 작동기로 PID나 최적 제어 알고리즘을 이용하여 일정한 힘을 유지하는 점에서 크게 벗어나지 못하고 있는 실정이다[11]. 그러나 로봇 그리퍼가 유연하고 그 크기가 작은 경우에는 여러 가지 작업 환경에서 외란에 대해 상대적으로 약하기 때문에 기존의 PID 제어기와 같은 재래식 제어 방법보다는 대상 제어 시스템의 변수 변동(parameter variation)이나 외란에 대해 강건한 슬라이딩 모드 제어기와 같은 강건 제어 알고리즘이 요구된다[12].

따라서 본 연구의 목적은 압전 세라믹을 작동기로 하는 스마트 유연 그리퍼를 구성하고, 강건 제어기의 하나인 슬라이딩 모드 제어 이론을 도입하여 강건 힘 제어를 수행함으로써 실제 로봇 그리퍼로써의 적용 가능성을 입증함에 있다. 이를 위해 해밀톤의 법칙을 이용하여 편미분 형태의 동적 지배 방정식과 경계 조건을 유도하고, 모드 해석 방법을 통하여 제어기 설계를 위한 상태 공간 제어 시스템을 도출하였다. 제어 시스템 모델 구성 시 실제 작업 환경에서 발생할 수 있는 고유 주파수 및 감쇠비의 변수 변동을 고려하였다. 제어기 설계를 위하여 먼저, 임의의 초기 조건에 대하여 추적 오차가 영(zero)으로 가기 위한 슬라이딩 서피스를 설정하였다. 슬라이딩 모드 영역을 지배하는 운동 방정식으로 부터 등가 제어기를 설계한 후, 슬라이딩 모드 존재 조건을 이용하여 불연속 강건 제어기를 구축하였다. 그리고 제어기 실현 시 발생할 수 있는 떨림 현상(chattering)을 제거하기 위하여 제어기가 내포하고 있는 부호 함수를 포화 함수로 대치하였다. 한편, 제어기 구현 시 필요한 모든 상태 변수는 선단 힘 신호를 이용한 완전 차수 관측기(full-order observer)를 설계하여 예측하였다. 제안된 힘 추적 제어기법의 효율성과 강건성을 입증하기 위하여 정현파 및 계단 함수로 정의된 요구 선단 힘 궤적을 설정하여 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 수행하였다. 또한 실험 결과로 부터 유도된 전압대 힘 정보를 갖고 실제 로봇 그리퍼로써의 적용 가능성을 입증하기 위하여 두 손가락 형태의 스마트 그리퍼를 구성하여 물체를 잡는 실험을 수행하였다.

2. 동적 모델링

본 연구에서 고려한 스마트 유연 그리퍼는 Fig.1에서 보는 바와 같이 복합 재료 외팔보의 한쪽 면에 압전 세라믹을 부착한 형태이다.

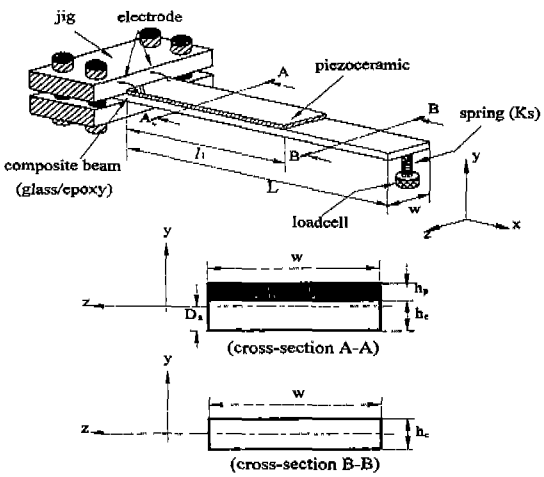

Fig. 1 Schematic diagram of a smart flexible gripper system

압전 세라믹에 전압 $V(x,t)$를 부가할 때 압전 세라믹에서 발생하는 변형률 ε_p는 다음식으로 표현된다[3].

$$\varepsilon_p(x,t) = V(x,t)\cdot\frac{d_{31}}{h_p} \tag{1}$$

이때 압전 세라믹 변형률로 인한 그리퍼의 합성 변형률 (resultant strain) ε_l 은 힘의 평형 상태로부터 구할 수 있으며 다음과 같다.

$$\varepsilon_l = \frac{E_p h_p}{E_c h_c + E_p h_p} \cdot \varepsilon_p \tag{2}$$

따라서 압전 세라믹 작동기에 전압 $V(x,t)$가 가해졌을 때, 그리퍼의 중립 축을 중심으로 균일하게 발생되는 굽힘 모멘트는 다음식으로 유도된다.

$$M = E_c h_c w \varepsilon_l (\frac{h_p}{2} - D_a) - E_p h_p w (\varepsilon_p - \varepsilon_l)(\frac{h_p}{2} + h_c - D_a) \tag{3}$$

여기서 D_a는 압전 세라믹이 부착된 A-A 부분의 밑면으로부터 중립 축까지의 거리이며 다음과 같다.

$$D_a = \frac{E_c h_c^2 + E_p h_p^2 + 2 h_c h_p E_p}{2(E_c h_c + E_p h_p)} \tag{4}$$

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

$$\begin{aligned} M &= -d_{31}(\frac{h_c + h_p}{2}) \frac{E_c E_p h_c w}{(E_c h_c + E_p h_p)} V(x,t) \\ &= c \cdot V(x,t) \end{aligned} \tag{5}$$

여기서 c는 제안된 그리퍼의 물리적, 기하학적 성질과 압전 세라믹의 성질에 의해 결정되는 상수이다. 식(5)는 작동기용 압전 세라믹의 영향이 모멘트의 형태로 전압에 비례하여 시스템에 작용됨을 의미하므로, 전압 $V(x,t)$와 연계된 알맞은 제어 알고리즘을 설계하면 힘 추적 제어가 가능함을 제시한다.

제안된 그리퍼를 Bernoulli-Euler 보라고 가정한 후 그리퍼의 운동 에너지 및 위치 에너지를 표현하면 각각 다음과 같다.

$$T_k = \frac{1}{2}\int_0^{l_1} \dot{y}^2 \rho_a A_a dx + \frac{1}{2}\int_{l_1}^{L} \dot{y}^2 \rho_b A_b dx \tag{6}$$

$$\begin{aligned} V_p = &\frac{1}{2}\int_0^{l_1} \frac{1}{E_a I_a}(E_a I_a y'' + c \cdot V(x,t))^2 dx + \\ &\frac{1}{2}\int_{l_1}^{L} E_b I_b y''^2 dx + \frac{1}{2} K_s \cdot y^2 \delta(x - L) \end{aligned} \tag{7}$$

여기서 $E_a I_a$와 $E_b I_b$는 각각 A-A부분과 B-B부분의 유효 굽힘 강성을 나타낸다. 또한 ρ_a, ρ_b, A_a, A_b는 각 부분의 밀도와 단면적을 나타내며 다음의 식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} &\rho_a = \rho_p + \rho_c, \ \rho_b = \rho_c \\ &A_a = w \times (h_p + h_c), \ A_b = w \times h_c \\ &E_a I_a = E_p[\frac{w h_p^3}{12} + w h_p (h_c + \frac{h_p}{2} - D_a)^2] \\ &\qquad + E_c[\frac{w h_c^3}{12} + w h_c (D_a - \frac{h_c}{2})^2] \\ &E_b I_b = E_c \frac{w}{12} h_c^3 \end{aligned} \tag{8}$$

한편 앞에서 제시한 운동 에너지와 위치 에너지를 해밀톤의 법칙에 대입하면 다음과 같은 지배 방정식과 경계조건이 얻어진다.

$$\begin{aligned} &E_a I_a y^{iv} + c \cdot V'' + \rho_a A_a \ddot{y} = 0, \ 0 \le x \le l_1 \\ &E_b I_b y^{iv} + \rho_b A_b \ddot{y} = 0 \ \ l_1 \le x \le L \\ &[E_a I_a y'' + c \cdot V] \big|_{x=l_1} = E_b I_b y'' \big|_{x=l_1} \\ &[E_a I_a y''' + c \cdot V'] \big|_{x=l_1} = E_b I_b y''' \big|_{x=l_1} \end{aligned} \tag{9}$$

$$\begin{aligned} &E_b I_b y'' \big|_{x=L} = 0 \\ &E_b I_b y''' \big|_{x=L} = K_s y \big|_{x=L} \end{aligned} \tag{10}$$

식(9)와 (10)에서 전압 $V(x,t)$는 그리퍼가 x축에 대하여 기하학적으로 일정한 형태를 갖고 있는 경우에 시간 t만의 함수인 $V(t)$로 간주될 수 있다.

편미분 형태의 지배 방정식(9)는 무한개의 진동 모드를 내포하고 있다. 따라서 제어기 설계를 위해 유한개의 진동 모드로 구성된 상태 방정식으로 표현해야 한다. 이를 위해 모드 해석법을 도입하면 변위 $y(x,t)$를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$y(x,t) = \sum_{i=1}^{n} \Phi_i^{(1)}(x) \cdot q_i(t), \quad 0 \le x \le l_1$$
$$y(x,t) = \sum_{i=1}^{n} \Phi_i^{(2)}(x) \cdot q_i(t), \quad l_1 \le x \le L \qquad (11)$$

여기서 $\Phi^{(1)}$는 A-A부분의 모드 형상 함수(mode shape function)를 나타내고, $\Phi^{(2)}$는 B-B부분의 모드 형상 함수를 나타낸다. 또한 $q_i(t)$는 i번째의 일반화 모달 좌표(generalized coordinate)이다.모드 해석을 이용해서 구한 운동 에너지와 위치 에너지를 라그란지 방정식에 대입하고, 비례 감쇠 항을 첨가하면 다음과 같은 비연계 상미분 방정식이 유도된다.

$$\ddot{q}_i + 2\xi_i\omega_i\dot{q}_i + \omega_i^2 q_i + \frac{K_s}{I_i}(\Phi_i^{(2)}(L))^2 q_i = -\frac{c \cdot V(t)}{I_i}\int_0^h \frac{\partial^2 \Phi_i^{(1)}}{\partial x^2} dx \qquad (12)$$

여기서, ω_i 및 ξ_i 는 각 모드의 고유 진동수 및 감쇠비(damping ratio)를 각각 나타내고, I_i 는 일반화 질량(generalized mass)으로 다음과 같다.

$$I_i = \int_0^h (\Phi_i^{(1)})^2 \rho_a A_a dx + \int_{l_1}^L (\Phi_i^{(2)})^2 \rho_b A_b dx \qquad (13)$$

3. 제어기 설계

앞 장에서 유도된 상미분 방정식(12)에 실제 환경에서 발생할 수 있는 외란을 첨가하면 다음과 같은 상태 공간 제어 시스템 모델을 구성할 수 있다.

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}V(t) + \mathbf{D}f(t)$$
$$F_t(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) \qquad (14)$$

여기서

$$x = [q_1 \ \dot{q}_1 \ q_2 \ \dot{q}_2 \cdots q_n \ \dot{q}_n]^T \qquad (15)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & & \\ -\omega_1^2 - \frac{K_s}{I_1}(\Phi_1^{(2)}(L))^2 & -\zeta_1\omega_1 & & \\ & & 0 & 1 \\ & & -\omega_n^2 - \frac{K_s}{I_n}(\Phi_n^{(2)}(L))^2 & -\zeta_n\omega_n \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{B} = -c\left[0 \ \ \frac{1}{I_1}\int_0^h \frac{\partial^2\Phi_1^{(1)}}{\partial x^2}dx \cdots \ 0 \ \ \frac{1}{I_n}\int_0^h \frac{\partial^2\Phi_n^{(1)}}{\partial x^2}dx\right]^T$$
$$\boldsymbol{C} = K_s[\Phi_1^{(2)}(L) \ \ 0 \ \cdots \ \Phi_n^{(2)}(L) \ \ 0]$$
$$\boldsymbol{D} = [0 \quad d_1 \quad \cdots \ 0 \quad d_n]^T \qquad (16)$$

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

그러나, 유연한 구조물의 시스템 모델링 과정에서 필요한 가정으로부터 야기 될 수 있는 모델 변수의 불확실성과, 작업시 미지의 선단 질량에 의한 시스템 변수 변동이 존재할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 시스템의 고유 진동수와 감쇠비에 다음과 같은 변수 변동을 부가하였다.

$$\omega_i = \omega_{o,i} + \delta\omega_i, \quad |\delta\omega_i| \le \beta_i\omega_{0,i}$$
$$\zeta_i = \zeta_{o,i} + \delta\zeta_i, \quad |\delta\zeta_i| \le \gamma_i\zeta_{0,i} \qquad (17)$$

여기서 $\omega_{o,i}$ 및 $\zeta_{0,i}$ 는 각각 알고 있는 i번째 모드의 시스템 고유 진동수 및 감쇠비의 공칭값(nominal value)을 나타내며, $\delta\omega_i$ 및 $\delta\zeta_i$ 는 이에 상응하는 변수 변동을 나타낸다. 이 변동의 크기는 가중치 β_i 와 γ_i 에 따

라 좌우되며, 일반적으로 실제 시스템에서 발생할 수 있는 변수 변동의 한계를 취한다. 따라서 식(14)의 시스템 행렬 $\mathbf{A}$를 공칭부 $\mathbf{A}_0$와 불확실성부 $\Delta\mathbf{A}$로 나누어 다음과 같은 제어 시스템 모델을 설정할 수 있다.

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}(t) &= (\mathbf{A}_0 + \Delta\mathbf{A})x(t) + \mathbf{B}V(t) + \mathbf{D}f(t)\\ F_t(t) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(t)\end{aligned} \tag{18}$$

여기서 행렬 $\mathbf{A}_0$및 $\Delta\mathbf{A}$의 성분은 식(17)을 식(16)의 행렬 $\mathbf{A}$에 대입하여 쉽게 얻을 수 있다.

그리퍼의 선단 힘에 대한 추적 제어를 수행하기 위해서 제어기는 임의의 초기 조건으로 부터 선단 힘 추적 오차를 영(zero)로 보내야 하므로 다음과 같이 오차를 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned}e(t) &= F_t(t) - F_{dt}(t)\\ &= K_s\sum_{i=1}^{n}\Phi_i^{(2)}(L)x_i\ (t) - F_{dt}(t)\\ \dot{e}(t) &= \dot{F}_t(t) - \dot{F}_{dt}(t)\\ &= K_s\sum_{i=1}^{n}\Phi_i^{(2)}(L)\dot{x}_i\ (t) - \dot{F}_{dt}(t)\end{aligned} \tag{19}$$

여기서 $F_{dt}(t)$는 연속적으로 미분 가능한 요구 선단 힘(desired tip force)을 나타낸다.

시스템(18)에서 압전 세라믹에 가해지는 제어 입력이 전압 하나이므로 다음과 같이 단일 슬라이딩 서피스를 설정한다.

$$\begin{aligned}s &= ge(t) + \dot{e}(t)\\ &= g[K_s\sum_{i=1}^{n}\Phi_i^{(2)}(L)x_i(t) - F_{dt}(t)]\\ &\quad + [K_s\sum_{i=1}^{n}\Phi_i^{(2)}(L)\dot{x}_i(t) - \dot{F}_{dt}(t)],\ g>0\end{aligned} \tag{20}$$

따라서, 알맞은 제어기를 사용하여 오차 상태 공간에서 임의의 위치에 있는 RP(representative point)를 식(20)으로 정의된 안정한 슬라이딩 서피스로 보낼 수 있다면 성공적인 추적 제어가 수행될 수 있을 것이다. 이렇게 실제 원하는 힘에 대한 추적 제어를 보장하기 위해서는 다음과 같은 슬라이딩 모드 존재 조건을 만족해야 한다.

$$s\dot{s} < 0 \tag{21}$$

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

$$\begin{aligned}\dot{s} &= g[K_s\sum_{i=1}^{n}\Phi_i^{(2)}(L)\dot{x}_i\ (t) - \dot{F}_{dt}(t)]\\ &\quad + \{K_s\sum_{i=1}^{n}\Phi_i^{(2)}(L)[r_{2i-1} + p_{2i-1} - \frac{K_s}{I_i}(\Phi_i^{(2)}(L))^2)x_i\\ &\quad + (r_{2i} + p_{2i})\dot{x}_i + d_i f(t)] - \ddot{F}_{dt}(t)\} + PV(t)\end{aligned} \tag{22}$$

여기서

$$\begin{aligned}P &= -c\cdot K_s\sum_{i=1}^{n}\frac{\Phi_i^{(2)}(L)}{I_i}\int_0^h\frac{\partial\Phi_i^{(1)}}{\partial x^2}dx\\ r_{2i-1} &= -\omega_{0,i}^2,\ p_{2i-1} = -(2\omega_{0,i}\delta\omega_i + \delta\omega_i^2)\\ r_{2i} &= -2\zeta_{0,i}\omega_{o,i},\ p_{2i} = -2(\omega_{0,i},\delta\zeta_i + \zeta_{0,i},\delta\omega_i + \delta\omega_i\delta\zeta_i)\end{aligned} \tag{23}$$

따라서 슬라이딩 모드 존재 조건(21)을 만족하는 제어기를 다음과 같이 제안할 수 있다.

$$\begin{aligned}V(t) &= -\frac{1}{P}\{g[K_s\sum_{i=1}^{n}\Phi_i^{(2)}(L)\dot{x}_i - \dot{F}_{dt}(t)]\\ &\quad + [K_s\sum_{i=1}^{n}\Phi_i^{(2)}(L)(r_{2i-1}x_i - \frac{K_s}{I_i}(\Phi_i^{(2)}(L))^2x_i + r_{2i}\dot{x}_i) - \ddot{F}_{dt}(t)]\\ &\quad + [k + K_s\sum_{i=1}^{n}|\Phi_i^{(2)}(L)|(|z_{2i-1}x_i| + |z_{2i}\dot{x}_i|)\mathrm{sgn}(s)\}\end{aligned} \tag{24}$$

여기서

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

제안된 제어기 식(24)를 이용하여 슬라이딩 모드 존재 조건(21)이 만족함을 다음과 같이 증명할 수 있다.

$$\begin{aligned} s\dot{s} &= s\{[g[K_s\sum_{i=1}^{n}\Phi_i^{(2)}(L)\dot{x}_i - \dot{F}_{dt}(t)] + \{K_s\sum_{i=1}^{n}\Phi_i^{(2)}(L)[(r_{2i-1}+p_{2i-1} \\ &\quad -\frac{K_s}{I_i}(\Phi_i^{(2)}(L))^2 x_i + (r_{2i}+p_{2i})\dot{x}_i + d_i f(t)] + \ddot{F}_{dt}(t)\} + PV(t)\} \\ &= s\{K_s\sum_{i=1}^{n}\Phi_i^{(2)}(L)[p_{2i-1}x_i + p_{2i}\dot{x}_i + d_i f(t)] \\ &\quad -[k + K_s\sum_{i=1}^{n}|\Phi_i^{(2)}(L)|(|z_{2i-1}x_i| + |z_{2i}\dot{x}_i|)]\mathrm{sgn}(s)\} < 0 \end{aligned} \quad (25)$$

상기식에서 k는 부호 함수와 연계된 불연속 제어 이득이다. 실제적인 제어기 구현에 있어서 불연속 제어기(24)는 떨림(chattering) 현상을 유발시켜 유연 구조물의 정밀한 힘 제어를 수행함에 있어서 바람직하지 못하므로 이 문제를 해결하기 위해서 정해진 경계 영역 두께 (ε) 안에서 불연속 제어기를 연속 제어기로 근사화 할 수 있다[13]. 즉, 식(24)의 비선형 함수인 부호 함수를 다음과 같이 포화 함수(saturation function)로 대체하여 연속 제어기로 사용할 수 있다.

$$sat(s)\begin{cases}\dfrac{s}{\varepsilon}, & |s| \le \varepsilon \\ \mathrm{sgn}(s), & |s| > \varepsilon\end{cases} \quad (26)$$

상기 제어기에서 제안된 상태 변수들은 실제 실험 시 제한된 측정 장비로 인하여 모두 알 수는 없다. 따라서 주어진 시스템의 $\mathbf{A}_0, \mathbf{B}, \mathbf{C}$ 행렬을 이용한 관측기를 설계하여 상태 변수들을 예측해야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 입력 전압과 구조물 선단 힘에 대한 정보를 이용하여, 다음과 같은 완전 차수 관측기를 구성하였다[14].

$$\dot{\tilde{x}}(t) = (\mathbf{A}_0 - \mathbf{RC})\tilde{x}(t) + \mathbf{R}F_t + \mathbf{B}V(t) \quad (27)$$

여기서, $[\mathbf{A}_0 - \mathbf{RC}]$ 행렬의 요구 고유치 실수부가 음의 값을 갖도록 관측기 게인 $\mathbf{R}$ 을 설정해야 한다. 한편, 상태관측기 (27)과 연계된 슬라이딩 모드 제어기 (24)의 강건성은 쉽게 증명된다[11].

4. 힘 추적 제어 결과 및 고찰

본 연구에서 제안된 스마트 유연 그리퍼를 구성하는 모재는 압전 재료와의 절연 효과를 위해 복합 재료(glass/epoxy)를 사용하였고, 그 재료 상수와 압전 세라믹의 성질 및 제원은 Table 1과 같다.

Table 1 Dimensional and mechanical properties of the smart flexible gripper

Composite Beam (glass/epoxy)				
Young's modulus (E_c)	thickness(h_c)	density (ρ_c)	width (w)	length (L)
6.4 GPa	0.5 mm	1865 kg/m^3	24 mm	100 mm
Piezoceramic				
Young's modulus (E_p)	thickness(h_p)	density (ρ_p)	width (w)	length (l_1)
64 GPa	0.8 mm	7700 kg/m^3	24 mm	60 mm
piezoelectric strain constant (d_{31})			$300\times10^{-12}\,m/V$	
stiffness of spring (K_s)			208.81 N/m	

복합 재료 상면에 부착된 압전 세라믹을 작동기로 사용하고, 힘 감지기(load cell)를 이용하여 연속적 귀환 제어 시스템을 구성하였다. 힘 감지기를 사용하여 그리퍼 끝단에서 측정한 힘 신호는 A/D 변환기를 통하여 디지탈 신호로 변환되어 마이크로 프로세서로 보내어진다. 이때 사용된 변환기의 샘플링 속도는 1000 samples/sec로 설정하여 실험을 수행하였다. 힘 감지기로 부터 얻은 구조물 선단의 힘과 제어 입력의 정보를 이용하여 설계된 관측기로부터 상태 변수를 계산한다. 계산된 상태 변수 값을 이용하여 슬라이딩 서피스를 구성하고, 추적 제어 알고리즘으로 부터 알맞은 제어 입력이 결정된다. 물론 제어 입력은 미리 컴퓨터에 설정된 미분 가능한 요구 추적 함수에 따라 영향을 받는다. 마이크로 컴퓨터에서 생성된 제어 입력 전압은 D/A 변환기를 거쳐서 1000배 DC전압 증폭기(voltage amplifier)를 통해 증폭되어 압전 세라믹에 공급된다. 이 공급 전압은 제어 모멘트를 생성하며 이로 부터 원하는 힘 추적 제어가 실현된다. 한편, 실험 결과를 저장하고 분석하기 위해서 신호 분석기(dynamic signal analyzer)를 이용하였다. 이러한 힘 추적 제어 실험을 위한 전체 실험 장치는 Fig.2에 나타내었다.

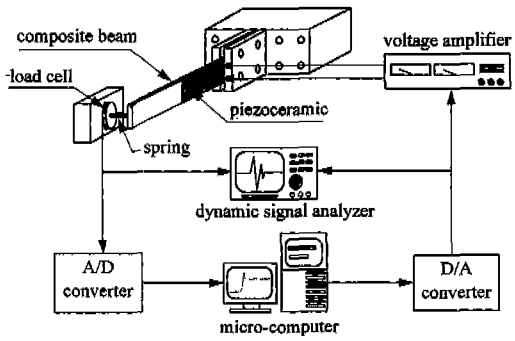

Fig. 2 Experimental apparatus for force tracking control

일반적으로 소형 유연 그리퍼의 작업은 2차 모드 이하의 저주파수 영역에서 주로 이루어지기 때문에 1차, 2차 모드만으로 모델링 하여도 충분하다. 따라서 실험과 시뮬레이션에 사용된 작동 제어 모드는 제 1차 및 2차 진동 모드이며, 이에 대한 모델 변수 값은 $\omega_1 = 112Hz$, $\omega_2 = 311Hz$, $\zeta_1 = 0.0336$, $\zeta_2 = 0.0146$ 이다. 이 값들은 스마트 유연 그리퍼의 작동기인 압전 세라믹 작동기에 랜덤 상태의 전압을 인가 시킨 후 힘 감지기로부터 얻은 전달 함수로부터 구하였다.

Fig.3은 추적 제어 시 가장 많이 도입되는 정현파(sine wave) 형태의 함수를 추적하는 경우의 제어 성능을 나타낸다. 이때 시스템의 외란에 대한 강건성을 입증하기 위해 $d_1 f(t) = 1.143\sin(200\pi t)$, $d_2 f(t) = 0.229\sin(200\pi t)$ 형태의 외란을 시뮬레이션과 실험에 모두 부가하였다. 이러한 외란의 크기와 주기는 실제 실험 환경을 고려하여 결정한 값으로 Fig.3 (b)의 초기부분과 같이 제어하기 전에 나타나 있다. 실험과 시뮬레이션에 사용된 슬라이딩 서피스의 기울기와 포화 함수의 경계 영역 두께 그리고 불연속 제어 이득은 각각 $g = 300$, $\varepsilon = 0.15$, $k = 145$ 의 값을 사용하였으며, 완전 차수 관측기 설계 시 사용된 요구 고유치는 -12975, -463, -24±705i 로 설정하였다. 한편, 사용된 제어기는 유연 구조물에서 발생되는 모델 변수의 불확실성과 사용된 스프링이 갖고 있는 비선형성에서 오는 전체 시스템의 모델 변수 변동 요소를 고려하기 위하여 외란과 변수 변동에 강건하도록 설계된 제어기(24)를 사용하였다. 이때 시스템 모델 불확실성을 고려하기 위하여 주요 시스템 변수인 고유 진동수에 β_1 = 1% (112±1.12Hz), β_2 = 0.5% (311±1.555Hz)와 감쇠비에 γ_1 = 8% (0.0336±0.002688), γ_2 = 10% (0.0146±0.00146)를 각각 부가하였다. 힘 추적 제어 결과에서 보면 요구 선단 힘에 대한 오차의 크기는 약 0.15초 후에 거의 영(zero)으로 도달하였다. 그러나, 제안된 제어기는 포화 함수를 포함하고 있기 때문에 요구 궤적의 상승 영역 부근에서 약0.0005N 정도의 작은 오차가 불가피하게 발생하였다. 물론, 이 오차의 크기는 포화 함수의 경계 영역 두께를 좁히면 감소하지만, Fig.4에서 보는 바와 같이 경계 영역 두께의 감소 ($\varepsilon = 0.13$)는 제어 입력의 떨림을 발생시키기 때문에 정밀한 추적 제어를 수행하기 어렵게 만들 수도 있다. 한편 Fig.3의 추적 제어 결과를 위한 제어 입력 궤적에서 볼 수 있듯이 사용된 압전 세라믹의 특정 최대 허용 전압(사용된 압전 세라믹의 경우 +400V~(-200V)내에서 떨림 현상 없이 부드러운 전압이 공급된 것을 알 수 있다. 전반적으로 볼 때, 정현파에 대한 추적 제어 결과는 우수하게 이루어지는 것을 알 수 있으며, 실험과 시뮬레이션 결과도 양호하게 일치하는 것을 볼 수 있다.

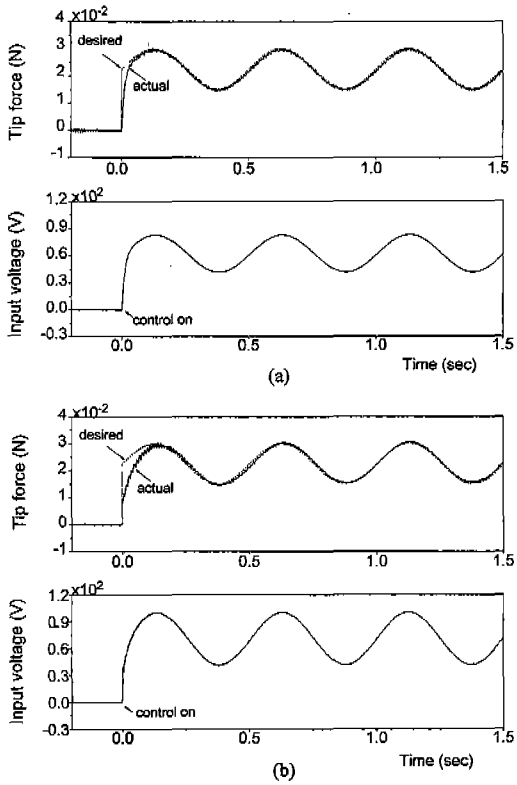

Fig. 3 Force tracking performance for sinusoidal trajectory (a)simulation result (b)experiment result

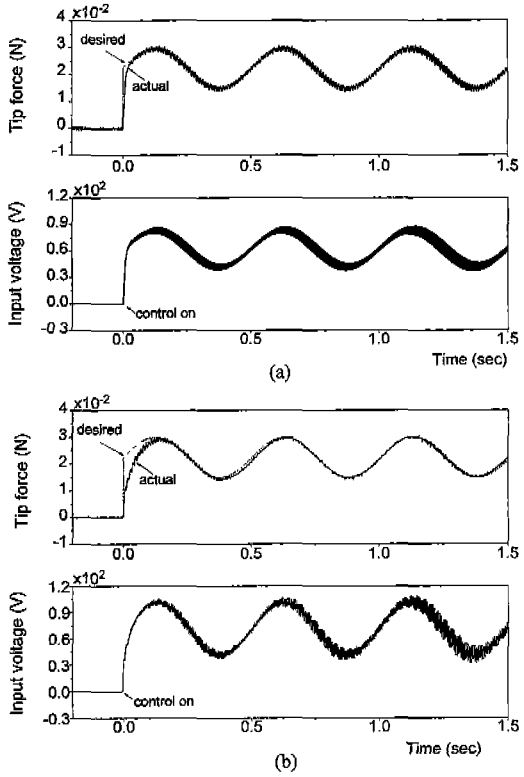

Fig. 4 Chattering phenomenon(ε=0.13)
(a) simulation result (b) experiment result

Fig.5는 진동수가 2Hz로 부터 시작해서 1초마다 2Hz씩 증가하는 정현파에 대한 힘 추적 제어의 실험과 시뮬레이션 결과이다. 이렇게 주파수가 변화하는 추적 궤적을 설정한 이유는 제어 시스템의 강건성과 빠른 응답성을 고찰하는데 있으며, 나아가서 각 해당 주파수에 대한 제어 입력의 크기를 알아보는 목적도 있다. 실험 결과에서 보면 힘 추적 제어를 위해 가해지는 제어 입력의 크기가 높은 주파수 영역에 접근할수록 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 제안된 그리퍼 시스템의 경우 첫번째 고유 진동수가 112Hz이며, 이 주파수로 접근할수록 적은 전압 공급으로 동일한 힘을 얻을 수 있기 때문이다. 실험 결과의 오차 궤적에서 보면 제안된 시스템의 스프링과 힘 센서에서 발생되는 히스테리시스(hysteresis) 현상 때문에 제어 초기 부근에 약간의 성능 저하가 발생하는 것을 알 수 있다. 또한 추적 함수의 고주파수 영역에서 위상차가 발생하여 오차 궤적이 증가하나 진폭에 대한 추적 제어는 비교적 양호하게 이루어지는 것을 볼 수 있다.

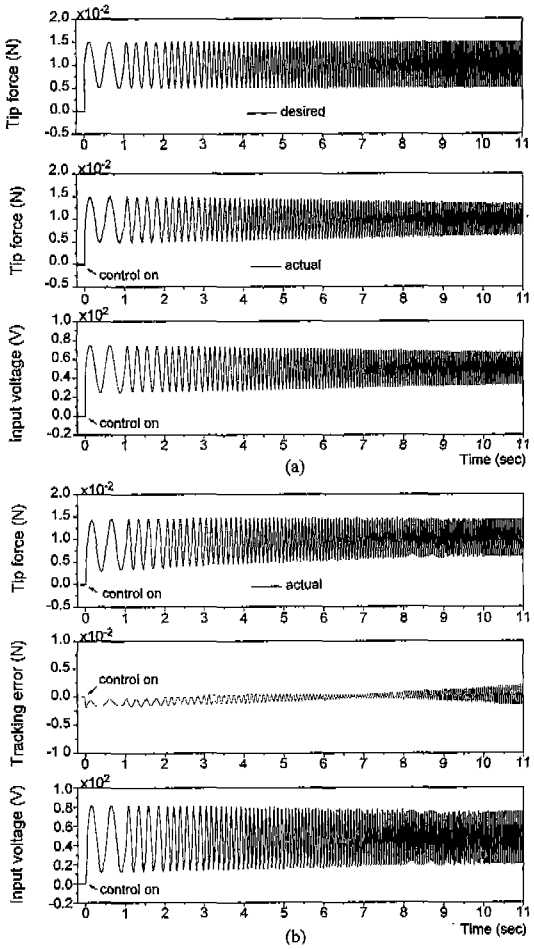

Fig. 5 Force tracking performance for sinusoidal trajectory of varying frequency
(a)simulation result (b)experimement result

Fig.6은 실제 로봇 그리퍼 등에서 많이 요구되는 운동으로 주기가 1Hz인 계단(step) 함수에 대한 추적 제어 결과이다. 모든 시뮬레이션과 실험 조건은 Fig.3의 정현파 추적 경우와 같으나 포화 함수의 경계 영역 두께 값은 0.3으로 사용하였다. 3.5초 동안의 제어 입력 결과를 보면 매초 마다 힘의 크기가 변할 때 제어 입력의 떨림 현상이 조금 존재하나 압전 세라믹의 빠른 반응성에 의해 잘 응답하였다. 선단 힘 추적 제어 결과를 보면 매초마다 갑작스러운 요구 추적 함수의 변화에 대한 오차가 발생한 것을 볼 수 있다. 그러나 오우버슈터(overshoot) 현상은 발생되지 않았으며, 정착에 필요한 시간은 약 0.25초로

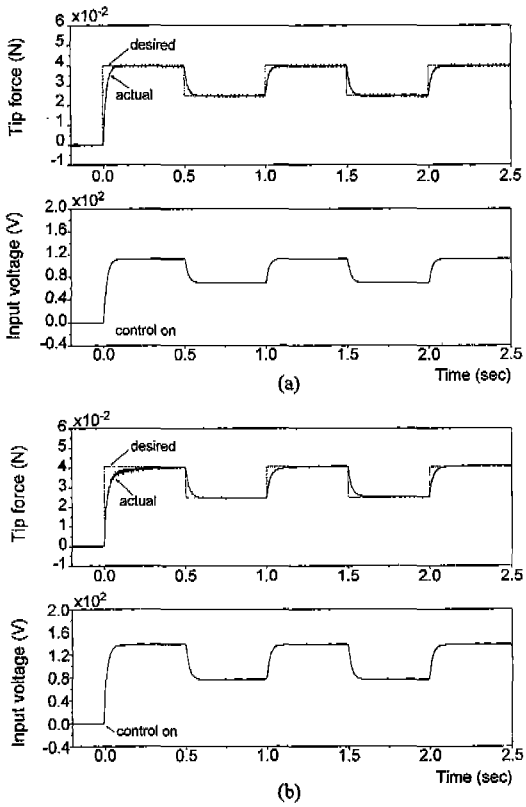

Fig. 6 Force tracking performance for step trajectory (a)simulation result (b)experiment result

서 비교적 빠른 추적 제어가 이루어짐을 알 수 있다. 한편, 슬라이딩 서피스의 기울기 값을 증가시키면 보다 빨리 정착이 일어나지만 제어 입력의 증가와 떨림을 발생시키기 때문에 적절한 값을 선택하여 사용해야 한다. 계단 함수에 대한 추적 제어에서도 실험과 시뮬레이션 결과가 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 그리고 이러한 추적 제어 성능은 응답성과 정밀성 측면에서 볼 때 로봇 그리퍼 등의 정밀한 위치 제어에 적용될 수 있는 높은 가능성을 제공한다.

제안된 그리퍼의 실용성을 입증하기 위하여 물체를 잡는 간단한 실험을 수행하였으며, 그 결과를 Fig.7에 사진으로 나타내었다. 구형의 탁구공(무게2.58g)을 잡기 위한 요구 힘을 알맞게 설정한 후 제어 알고리즘에 의해 결정된 입력 전압을 양쪽 그리퍼의 작동기에 공급하였다. 100V의 부드럽고 연속적인 제어 전압 공급으로 물체를 완전히 잡는 것을 볼 수 있다.

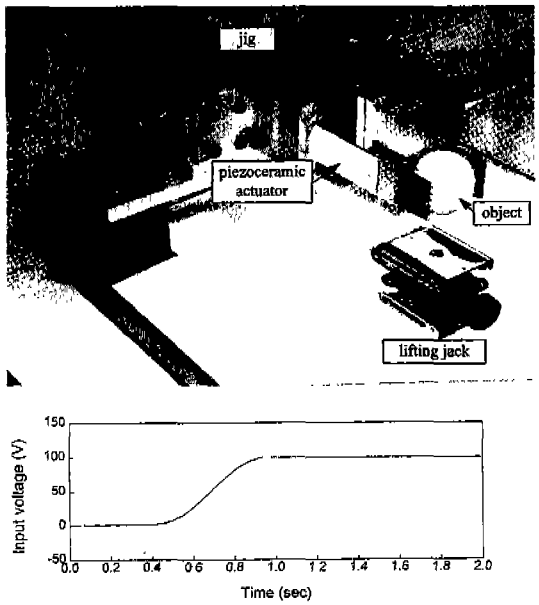

Fig. 7 Photograph of the two-fingered gripper for the demonstration of holding an object

5. 결 론

소형 스마트 유연 그리퍼의 힘 추적 제어를 위해 압전 세라믹 작동기를 사용하였고, 이와 연계된 슬라이딩 모드 제어기를 구성하였다. 이때 관측기를 함께 구성하여 제어기에 필요한 모든 상태 변수들을 예측하여 사용하였다. 제안된 제어 알고리즘의 실험적 구현 결과 주파수가 일정한 정현 파형, 주파수가 변하는 정현 파형, 그리고 계단형의 함수로 구성된 요구 선단의 힘 궤적을 우수하게 추적함이 입증되었다. 이러한 힘 추적 제어 효과의 우수성은 정밀성 및 변수 변동이나 외란에 대한 강건성 등으로 설명된다. 또한 두 스마트 유연 그리퍼를 이용, 물체를 잡는 간단한 실험을 수행함으로써 제안된 그리퍼의 실제 적용 가능성을 제시하였다. 향후 여러개의 스마트 그리퍼로 이루어진 시스템을 구축하여 다양한 무게와 형상의 물체를 효과적으로 잡을수 있는 제어기의 설계 및 실험적 구현이 계속 연구될 예정이다.

참고문헌

1. S. B. Choi, Y. K. Park and M. S. Suh, "Elastodynamic Characteristics of Hollow

Cantilever Beams Containing an Electro-Rheological Fluid : Experimental Results," AIAA Journal, Vol. 32, No. 2, pp. 438-440, 1994.

2. C. A. Rogers, "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, 1990.
3. T. Bailey and J. E. Hubbard, Jr., "Distributed Piezoelectric-Polymer Active Vibration Control of a Cantilever Beam," Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 8, No. 5, pp. 605-611, 1985.
4. H. S. Tzou, "Distributed Modal Identification and Vibration Control of Continua : Theory and Applications," ASME J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 113, pp. 494-499, 1991.
5. E. F. Crawley and Javier de Luis, "Use of Piezoelectric Actuators as Elements of Intelligent Structures," AIAA Journal, Vol. 25, No. 10, pp. 1373-1385, 1987.
6. A. Baz and S. Poh, "Performance of an Active Control System with Piezoelectric Actuators," Journal of Sound and Vibration, Vol. 126, No. 2, pp. 327-343, 1988.
7. S. B. Choi, "Alleviation of Chattering in a Flexible Beam Control via Piezofilm Actuator and Sensor," AIAA Journal, Vol. 33, No. 3, pp. 564-567, 1995.
8. S. B. Choi, C. C. Cheong, B. S. Thompson and M. V. Gandhi, "Vibration Control of Flexible Linkage Mechanisms Using Piezoelectric Films," Mechanism and Machine Theory, Vol. 29, No. 4, pp. 535-546, 1994.
9. Z. W. Jiang, S. Chonan and J. Tani, "Tracking Control of a Miniature Flexible Arm Using Piezoelectric Bimorph Cells," The International Journal of Robotics Research, Vol. 11, No. 3, pp. 260-267, 1992.
10. 박노준, 최승복, 정재천, "형상기억합금작동기를 이용한 스마트 구조물의 진동 및 위치 추적제어", 한국정밀공학회, 제13권 제8호, pp.155-163, 1996.
11. S. Chonan, Z. W. Jiang and S. Sakuma, "Force Control of a Miniature Gripper Driven by Piezoelectric Bimorph Cells," Trans. of the JSME(series C), Vol. 59, No. 557, pp. 150-157, 1992.
12. S. B. Choi, C. C. Cheong and H. C. Shin, "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, 1995.
13. J. J. Slotine and S. S. Sastry, "Tracking Control of Nonlinear Systems Using Sliding Surfaces with Application to Robot Manipulators," International Journal of Control, Vol. 38, No. 2, pp. 465-492, 1983.
14. C. T. Chen, "Linear System Theory and Design", CBS College Publishing, pp. 351-361, 1984.