

## 압전작동기를 갖는 유연머니플레이터의 컴플라이언트 제어

### Compliant Control of a Flexible Manipulator Featuring a Piezoactuator

°김형규\*, 최승복\*

\* 인하대학교 기계공학과(Tel: 032-860-7319, Fax: 032-868-1716, E-mail: seungbok@dragon.inha.ac.kr)

**Abstracts:** This paper presents a new control strategy for the position and force control of a flexible manipulator. The governing equation of motion of a two-link flexible manipulator which features a piezoceramic actuator is derived via Hamilton's principle. The control torque of the motor to command desired position and force is determined by a sliding mode controller. This controller is formulated to take account of parameter uncertainties and external disturbances. During the commanded motion, undesirable oscillation is actively suppressed by applying a feedback control voltage to the piezoceramic actuator. Consequently, an accurate compliant motion control of the flexible manipulator is achieved. Computer simulations are undertaken in order to demonstrate the effectiveness of the proposed control methodology.

**Keywords:** Compliant Control, Piezoceramic Actuator, Flexible Manipulator, Sliding Mode Control with Perturbation Estimation

#### 1. 서론

현재 사용되고 있는 대부분의 로봇 머니플레이터는 구조적 진동을 최소화하기 위하여 큰 부피와 무게를 갖는 강체로 구성되어 있으며 주로 주변작업 환경과 관계되어 작동되고 있다. 이러한 로봇 머니플레이터가 주로 적용되는 예로는 디버링(deburring), 연삭(grinding), 조립(assembling)작업등을 들 수 있는데 이러한 작업 시 외부작업 환경과의 접촉으로 인하여 발생하는 외력때문에 순수한 위치 제어만으로는 원하는 작업을 수행할 수 없도록 한다. 따라서 작업중에 필연적으로 발생하는 외력을 수용할 수 있는 새로운 방법의 도입이 요구된다. 이렇게 외부 환경에 일정한 힘을 가하면서 원하는 작업을 수행하기 위하여 리아프노프 안정성의 정리를 이용한 방법[7], 최적 제어 기법[9], 그리고 적응 제어를 이용한 방법[4] 등 많은 제어 기법이 연구되었다. 그러나 대부분의 연구 결과는 강체 링크만으로 구성된 로봇 머니플레이터의 경우에 국한한다. 이 경우 관절의 회전각과 링크 길이만으로 단말 조작용의 위치를 알 수 있고, 또한 로봇 머니플레이터의 운동 시 자체 진동이 거의 없어 제어가 용이하다. 그러나, 링크 자체의 큰 부피와 무게는 상대적으로 작은 가반 중량(payload)을 갖게 되고 원하는 작업을 수행하기 위하여 비교적 큰 토크를 요구하는 문제점을 초래한다. 이와 같은 문제점은 상대적으로 큰 가반중량을 필요로 하는 우주 로봇, 수중 로봇 등에 특히 중요시 된다.

따라서 로봇 팔을 경량화하기 위한 유연 링크를 고려한 유연 로봇 머니플레이터의 연구가 시작되었고, 현재 유연 링크를 갖는 로봇시스템의 힘과 위치제어와 관련된 연구로는 다음을 들 수 있다. Matsuno 등[6]은 특이 섭동법(singular perturbation method)으로부터 유도된 준정적(quasi-static)상태식을 이용하여 제어를 구성하였고, Yosikawa 등[8]은 유연 링크로 구성된 로봇 머니플레이터의 선단에 강체 링크를 부착하여 전체 시스템을 유연 링크로 구성된 매크로(macro)와 강체 링크로 구성된 마이크로(micro)시스템으로 나누어 제어하는 방법을 연구하였다. 그러나 탄성 로봇 팔의 진동을 억제하기 위해 지금까지 제안된 대부분의 제어기들은 모터에 입력되는 토크를 결정하는데 있어서 강체모드 및 유연개의 탄성모드를 동시에 고려하기 때문에 제어기의 실제 구현에 있어서 하드웨어의 신호잡음등과 연관되어 컴퓨터에서 계산된 토크의 정확한 입력이 용이하지 않았다.

본 연구에서는 유연 로봇 머니플레이터의 컴플라이언트 제어를 위해 모터와 지능재료중 하나인 압전세라믹 작동기를 이용한다. 지능재료 중 감지기 및 작동기 기능을 동시에 지니고 있

는 압전재료는 잘 알려진 바와 같이 압력이 가해지면 전압이 발생하고 반대로 전압이 가해지면 변형을 일으키는 특성을 갖고 있다[5]. 압전재료중 압전세라믹은 압전필름에 비해 훨씬 적은 입력전압으로 큰 힘을 발생할 수 있기 때문에 작동기로 사용하기에 적합하다. 최근 몇 년간 파라미터 변화와 외란에 강건한 제어 알고리즘에 대한 연구가 활발히 진행 중에 있다. 그 중에서 가장 대표적 제어 기법중의 하나가 슬라이딩 모드 제어 방법이다. 슬라이딩 모드 제어방법은 비교적 제어 대상 시스템의 파라미터 변화 및 외란에 강건한 특성을 갖고 있으며 제어 알고리즘이 간단하여 많은 분야에서 연구되고 있다. 본 논문에서는 위와 같은 특성을 갖는 슬라이딩 모드 제어기를 사용하여 2개의 링크를 갖는 유연머니플레이터의 힘 및 위치 제어를 수행한다. 우선 2 링크 유연머니플레이터의 운동방정식을 라그랑지(Lagrange)방법으로 유도한 후, 주어진 표면구속조건(surface constraint condition)을 관절구속조건으로 구축하고, 제안된 제어기의 효율성을 입증하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 수행한다.

#### 2. 시스템 모델링

본 연구에서 고려한 2 링크 유연 로봇 머니플레이터는 Fig.1.에서 보는 바와 같이 1개의 강체 링크와 1개의 유연 링크로 구성된 평면(planar)로봇이다. 이 그림에서 OXY 좌표는 기준 좌표계(reference coordinate)를 나타내며,  $\theta_1$ 은 강체 링크의 회전각을,  $\theta_2$ 는 유연 링크가 변형되지 않았을 때의 회전각을 나타낸다. 그리고  $w(x,t)$ 는 유연 링크의 좌표축  $O_1X_1$ 을 따라 거리  $x$ 만큼 떨어진곳에서 발생하는 탄성변형(elastic deflection)을 나타내며, 이 탄성변형은 모드가정법(assumed mode method)을 사용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$w(x,t) = \sum_{i=1}^{\infty} \phi_i(x) a_i(t) \quad (1)$$

여기서 길이의 함수  $\phi_i(x)$ 와 시간의 함수  $a_i(t)$ 는 각각  $i$  번째 모드의 고유함수와 시스템의 일반화 좌표를 나타낸다. 따라서, 유연 링크의 좌표축  $O_1X_1$ 을 따라  $x$ 만큼 떨어진 위치에서의 전체 변위는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y(x,t) = w(x,t) + x \cdot \theta_2(t) \quad (2)$$

전압  $V(x,t)$ 에 의하여 작동기용 압전세라믹으로부터 발생하는 굽힘모멘트는 축방향에 대한 힘-평균관계로부터 중립축에

대하여 구할 수 있으며 그 결과는 다음과 같다[2].

$$M = -\varepsilon_c E_c t_c b \left[ t_f + \frac{t_c}{2} + t_a - D_n \right] \quad (3)$$

$$= c \cdot V(x, t)$$

여기서  $c$ 는 굽힘모멘트를 전압으로 나눈것을 의미하며 제안된 링크의 기하학적 및 재료 특성에 의하여 결정된다. 그리고  $t_c, t_a, t_f$ 는 각각 압전세라믹, 알루미늄, 압전필름의 두께이며,  $D_n$ 은 압전세라믹 및 압전필름 부착구간의 중립축이고,  $b$ 는 링크의 너비이다.  $E_c$ 는 압전세라믹의 탄성계수이다.

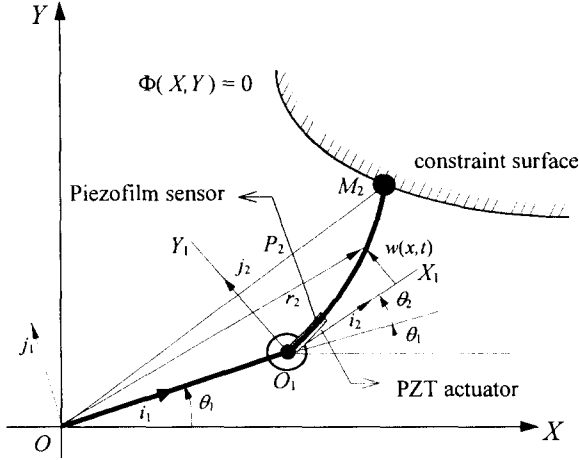


그림 1. 2-링크 유연머니플레이터  
Fig. 1. Two-Link Flexible Manipulator

로봇 머니플레이터의 선단에 대한 위치벡터  $P_2$ 와 유연 링크의 일반 좌표에 대한 위치벡터  $r_2$ 와 각각의 시간에 대한 미분치는 다음과 같다.

$$P_2 = L_1 i_1 + L_2 i_2 + w(L_2, t) j_2$$

$$\dot{P}_2 = L_1 \dot{\theta}_1 j_1 - w(L_2, t) (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) j_2 + (L_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) + \dot{w}(L_2, t)) j_2 \quad (4)$$

$$r_2 = L_1 i_1 + L_2 i_2 + w(x, t) j_2$$

$$\dot{r}_2 = L_1 \dot{\theta}_1 j_1 - w(x, t) (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) j_2 + (L_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) + \dot{w}(x, t)) j_2$$

전체 링크에 대한 운동에너지는 각 링크의 운동에너지와 선단 질량에 대한 운동에너지의 합으로 전체 운동에너지는 다음과 같이 표현된다.

$$T = \frac{1}{2} J_1 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} J_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + \frac{1}{2} M_2 \dot{P}_2^T \dot{P}_2 + \frac{1}{2} \int_0^{L_1} \dot{r}^T \dot{r} (\rho_a + \rho_c + \rho_f) dx + \frac{1}{2} \int_0^{L_2} \dot{r}^T \dot{r} \rho_a dx \quad (5)$$

강체 링크의 전체 길이는  $L_1$ 이며  $J_1$ 은 모터 1과 강체링크의 전체 관성모멘트이며,  $J_2$ 는 모터 2의 관성모멘트이다.  $L_2$ 는 유연 링크의 길이, 즉 두 번째 링크의 길이이며,  $l$ 은 압전세라믹과 압전필름의 부착구간 길이이며,  $M_2$ 는 두 번째 링크의 선단에 고정된 선단질량이다. 그리고  $\rho_a, \rho_c, \rho_f$ 는 알루미늄, 압전세라믹 및 압전필름의 단위 길이 당 질량이다.

전체 링크에 대한 위치 에너지는 유연 링크 성분의 변형에 의한 위치 에너지(strain potential energy)로 표현되며, Euler-Bernoulli 법으로 가정하여 인장 및 전단 효과를 무시하면 다음과 같이

$$V = \frac{1}{2} \int_0^{L_1} \frac{1}{E_A I_A} (E_A I_A w''(x, t) - c \cdot V(x, t))^2 dx + \frac{1}{2} \int_0^{L_2} E_B I_B w''(x, t)^2 dx \quad (6)$$

표현된다.

여기서  $E_A I_A$ 는 압전세라믹과 압전필름부착구간의 유효굽힘강성이며  $E_B I_B$ 는 나머지 구간의 유효굽힘강성이다.

전압  $V(x, t)$ 는 압전세라믹이  $x$ 에 대하여 기하학적으로 일정한 형태를 갖고 있는 경우에 시간  $t$ 만의 함수인  $V(t)$ 로 간주 할 수 있다. 따라서 제어전압의 공간에 대한 편미분항은 소거될 수 있다. 한편, 비보전력인 외부 토크  $T_i(t)$ 에 의한 일은 다음과 같이 나타낸다.

$$V_a = \sum_{i=1}^2 -T_i(t) \cdot \theta_i(t) \quad (7)$$

구속조건의 존재는 로봇 머니플레이터가 구속조건의 도입으로 인하여 구속조건의 수만큼 자유도를 잃는 것을 의미한다. 여기서 구속조건은 다음과 같이 표현된다.

$$\phi(\theta_1, \theta_2, w(L_2, t)) = 0 \quad (8)$$

위의 구속조건에 의해 유연 로봇 머니플레이터의 선단에서의 구속력 즉, 단말조각기와 구속표면과의 접촉력을 라그랑지안 멀티플라이어  $\lambda$ 를 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$f = \sum_{i=1}^{2+n} J_i \lambda \quad (9)$$

여기서  $J_i$ 는 Jacobian 행렬을 나타낸다. 그리고 고려되는 링크의 수는 2이며 고려되는 주요 진동모드의 수는  $n$ 이다.

이제 이상의 식들을 이용하여 라그랑지 방정식(Lagrange's equations)으로부터 시스템의 운동방정식을 유도하면 다음과 같다.

$$M \cdot \ddot{q} + F + G + K + \Delta R = B \cdot u + f + D$$

$$q = [\theta_1, \theta_2, a_1, \dots, a_n]^T$$

$$M = [m_{ij}] \quad i, j = 1, \dots, 2+n$$

$$F = [F_1(\theta, \dot{\theta}, a), F_2(\theta, \dot{\theta}, a), \dots, F_{2+n}(\theta, \dot{\theta}, a)]^T$$

$$G = [G_1(\theta, \dot{\theta}, a, \dot{a}), G_2(\theta, \dot{\theta}, a, \dot{a}), \dots, G_{2+n}(\theta, \dot{\theta}, a, \dot{a})]^T \quad (10)$$

$$K = [K_1(a), K_2(a), \dots, K_{2+n}(a)]^T$$

$$\Delta R = \Delta M \cdot \ddot{q} + \Delta F + \Delta G + \Delta K$$

$$B = [B_{jk}] \quad k = 1, \dots, 3$$

$$u = [T_1(t), T_2(t), V(t)]^T$$

$$D = [D_1, D_2, \dots, D_{2+n}]^T$$

여기서  $M$ 은 질량행렬이고,  $F$ 와  $G$ 는 시스템의 비선형 행렬이며,  $\Delta R$ 은 시스템 운동방정식의 불확실성(dynamic uncertainty)을 나타내며,  $D$ 는 외부에서 시스템에 들어오는 외란항이며,  $B$ 는 입력행렬이다.

### 3. 제어기 설계

본 연구에서 제안된 제어알고리즘은 각각의 허브에 장착된 모터와 유연 링크의 표면에 장착된 압전세라믹 작동기를 위한 제어 알고리즘이다. 유연 로봇 머니플레이터의 구속운동중 각각의 허브 각도와 유연 링크 선단에서의 구속력 및 운동중에 필연적으로 발생하는 바람직하지 않은 진동을 능동적으로 제어함으로써, 요구되는 선단운동과 구속력을 보장하는 모터의 토크와 압전세라믹의 입력전압을 결정하기 위해 슬라이딩 모드 제어를 설계한다. 여기서, 제어기설계의 목적은 진동의 발생 없이 시간이 경과하면서  $\theta_i$ 와  $\lambda$ 가 각각의 링크의 요구경로와 요구라그랑지안 멀티플라이어인  $\theta_{id}$ 와  $\lambda_d$ 를 추적하는 것이므로 다음과 같은 슬라이딩 서피스를 설정한다.

$$s_k = \sum_{i=1}^{2+n} (c_{k(2i-1)} e_{2i-1} + c_{k(2i)} e_{2i}) + J_k \int_0^t (\lambda_d - \lambda) dt$$

$$e_{2i-1} = \theta_i - \theta_{id} \quad , \quad e_{2i} = \dot{\theta}_i - \dot{\theta}_{id} \quad 1 \leq i \leq 2 \quad (11)$$

$$e_{2i-1} = a_{(i-2)} - a_{(i-2)d} \quad , \quad e_{2i} = \dot{a}_{(i-2)} - \dot{a}_{(i-2)d} \quad 2 < i \leq 2+n$$

여기서  $c_{k(2i-1)}$ 와  $c_{k(2i)}$ 는 슬라이딩 서피스의 기울기를 나타낸다. 알맞은 슬라이딩 서피스의 기울기를 결정하여 임의의 오차 공간상에 있는 RP(representative point)를 이 슬라이딩 서피스 위로 보낼 수 있다면 추적오차는 점진적으로 영이 될 것이다. 이것은 다음과 같은 슬라이딩 모드 존재조건을 만족함으로써 성취 할 수 있다.

$$\dot{s} \cdot s < 0 \quad (12)$$

조건(12)를 만족시키기 위하여 다음과 같은 슬라이딩 모드 제어기를 제안한다.

$$u_k = \frac{1}{b_{kk}} \left[ -\sum_{i=1}^{2+n} c_{k(2i-1)} e_{2i} + F_k + G_k + K_k - J_k \cdot \lambda_d - k_k \cdot \text{sgn}(s_k) \right] \quad (13)$$

여기서  $k_k$ 는 불연속제어이다.

일반적으로 기존의 슬라이딩 모드 제어기의 불확실성이나 외란에 대한 강건성을 보장하기 위한 불연속제어를 결정하는 방법은 몇 가지의 단점을 가지고 있다. 우선 설계자가 외란이나 불확실성의 경계값들에 대한 사전지식이 있어야 하며, 이러한 방법으로 설계된 불연속제어  $k_k$ 는 과도하게 설계되곤 했다. 이것은 실제 시스템에 적용 시 불확실성이나 외란의 경계값들을 안다는 것이 쉽지 않고 또한 과도하게 설계된 제어기의 입력에 의해 바람직하지 않은 제어진동이나 작동기에 무리를 주어 나쁜 추적제어 성능을 초래 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 외란이나 불확실성을 관측하여 그 관측된 값에 비례하여 불연속제어를 결정하는 즉, 외란이나 불확실성의 경계값들에 대한 정보가 필요없는 SMCPE(sliding mode controller with perturbation estimation)를 사용하였다[3].

이 방법에서 고려하는 시스템의 불확실성의 경계값들에 대하여 알지 못할 때 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Psi(x, t)_{actual} = \Delta M \cdot \ddot{q} + \Delta F + \Delta G + \Delta K - D$$

$$= -M \cdot \ddot{q} - F - G - K + B \cdot u(t) + J \cdot \lambda \quad (14)$$

일반적으로 요구경로와 구속력을 동시에 제어하는 킴플라이언트 제어 시에는 보통 시스템의 운동속도가 느리므로 시스템의 운동속도가 느리다는 가정하에서 불확실성의 변화 또한 느리다고 가정할 수 있으므로 다음과 같이 관측할 수 있다.

$$\Psi(x, t)_{estimated} = -M \cdot \ddot{q} - F - G - K + B \cdot u(t - \delta) + J \cdot \lambda \quad (15)$$

여기서  $\delta$ 는 표본시간(sampling time) 간격이며, SMCPE를 이용하여 제어기를 설계하면 다음과 같다.

$$u_k = \frac{1}{b_{kk}} \left[ -\sum_{i=1}^{2+n} c_{k(2i-1)} e_{2i} + F_k + G_k + K_k - J_k \cdot \lambda_d - k_k \cdot \text{sgn}(s_k) + \Psi(t)_{estimated} \right] \quad (16)$$

그러나 위와 같이 설계된 슬라이딩 모드 제어기는 미분제어 요소만을 포함하게 된다. 잘 알려진 바와 같이 미분제어 요소는 오차 신호 자체에 대하여 동작하는 것이 아니라 변화율에 따라 증가하므로 미분제어 요소만으로는 결코 우수한 위치제어 효과를 얻을 수 없다. 따라서, 제어기에 비례제어요소  $P \cdot s$ 를 결합하여 제어기를 설계하면 다음과 같다.

$$u_k = \frac{1}{b_{kk}} \left[ -P \cdot s - \sum_{i=1}^{2+n} c_{k(2i-1)} e_{2i} + F_k + G_k + K_k - J_k \cdot \lambda_d - k_k \cdot \text{sgn}(s_k) + \Psi(t)_{estimated} \right] \quad (17)$$

$$P > 0$$

식(17)의 제어기에 의해 슬라이딩 서피스의 동적 거동은 다음과

같이 된다.

$$\dot{s}_k = -P \cdot s_k - k_k \cdot \text{sgn}(s) + \Psi(t)_{estimated} - \Psi(t)_{actual} \quad (18)$$

따라서, 다음을 만족하는 불연속제어인  $k_k$ 를 구하면 슬라이딩 모드 존재조건(12)를 만족시킬 수 있다.

$$\left[ k_1, \dots, k_k \right]^T = \eta \left| \Psi(t)_{estimated} \right| \geq \left| \Psi(t)_{estimated} - \Psi(t)_{actual} \right|, \quad \eta > 0 \quad (19)$$

실제적인 제어기 구현에 있어서 불연속 제어기는 하드웨어에 악영향을 미치는 떨림현상(chattering)을 발생하므로 바람직하지 않다. 이 문제의 해결을 위하여 정해진 경계 영역 내에서 불연속 제어기를 연속 제어기로 근사화 할 수 있다. 따라서 경계 영역 ( $\varepsilon$ ) 내에서의 (18)식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{s}_k + \left( P \cdot I + \frac{k_k}{\varepsilon_k} \right) s_k = \Psi(t)_{estimated} - \Psi(t)_{actual} \quad (20)$$

위 식의 오른쪽 항은 경계(bound)가 되어 있기 때문에 슬라이딩 서피스  $s$ 는 안정하다. 따라서, 추적오차가 0(zero)으로 수렴함을 알 수 있다.

제안된 시스템에서 사용된 모터 1,2 가 감속기가 부착된 감속기 일체형으로 가정하면 모터의 운동 시 감속기에서 발생하는 마찰을 고려해야 한다. 이 연구에서 고려하는 마찰력은 불연속적으로 변하는 Columb 마찰로써 외란이나 불확실성의 변화속도가 느리다는 가정하에서 적용하는 SMCPE의 외란에 포함할 수 없다. 그러나 Columb 마찰력은 비교적 정확한 모델링이 가능하기 때문에 피드포워드(feedforward)제어 입력으로 보상하였다. 따라서 슬라이딩 모드 제어기(17)은 시스템의 불확실성에 대해서만 고려하여 설계하였고, 모터내에서 발생하는 Columb 마찰력이 고려되지 않은 시스템 모델로부터 구해진 것이므로, 이 Columb 마찰력을 고려한 피드포워드 제어입력  $u_F$ 를 부가하면 전체 제어입력  $u$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$u = u_k + u_F \quad (21)$$

여기서  $u_F = -F \cdot \text{sgn}(\dot{\theta})$ 이다.

#### 4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

제안된 제어 알고리즘의 우수한 제어 성능을 고찰하기 위하여 유연 링크의 주요 진동모드  $n$ 을 2 차모드까지 고려하였으며, 선단질량은 0.05kg으로 설정하였다. 컴퓨터 시뮬레이션에 사용된 강체링크의 전체 길이는 1.2m이며, 유연 링크와 압전재료의 성분은 Table.1에 나타내었다. 본 연구에서는 유연 로봇 머니폴레이터가 작업하는 환경을 반경이  $R$ 인 원형 표면 구속조건으로 선택하였다. 이에 따른 구속방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Phi(X_p, Y_p) = X_p^2 + Y_p^2 - R^2 = 0$$

$$X_p = L_1 \cos(\theta_1) + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) - w(L_2, t) \quad (22)$$

$Y_p = L_1 \sin(\theta_1) + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + w(L_2, t)$   
위의 구속방정식에 의해  $\theta_2$ 는 다음과 같은 함수로 나타낼 수 있다[11].

$$\theta_2 = \Omega(\theta_1, a_1, a_2) \quad (23)$$

작업반경  $R$ 은 1.7m로 정하였으며, 한편 요구라그랑지안 멀티플라이어  $\lambda_d$ 는 0.1이며, 요구경로  $\theta_{id}$ 는  $0.05 \times \text{time}[\text{rad}]$ 로 정하였다. 유연 링크의 선단과 작업환경과의 마찰은 없다고 가정한다. 제안된 제어 알고리즘의 강건성을 입증하기 위하여 운동방정식의 불확실성(dynamic uncertainty)을 30%로 고려하여 시뮬레이션을 수행하였다.

Fig.2는 압전세라믹에 입력전압의 부하시와 무부하시의 응답

표.1. 알루미늄빔과 압전필름, 압전세라믹의 기계적 성질  
Table.1 Dimensional and Mechanical Properties of the Aluminum Link, Piezofilm, Piezoceramic

	Aluminum	Piezofilm	Piezoceramic
Young's modulus	65 GPa	2 GPa	64 GPa
Thickness	10 mm	0.05 mm	10 mm
Density	2890 kg/m <sup>3</sup>	1780 kg/m <sup>3</sup>	7700 kg/m <sup>3</sup>
Width	100 mm	100 mm	100 mm
Length	1.0 m	0.2 m	0.2 m
Total moment of inertia [ $J_1$ ]	1.0 kgm <sup>2</sup>		
Moment of inertia of motor [ $J_2$ ]	0.1 kgm <sup>2</sup>		
Piezoelectric strain constant of piezoceramic	$-300 \times 10^{-12}$ (m/m)/(V/m)		

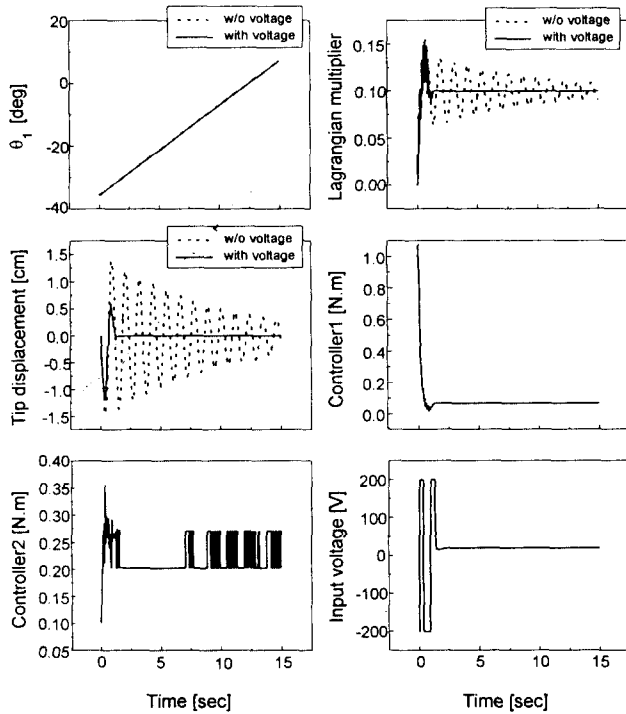


그림 2. 제어 응답비교  
Fig. 2. Comparison of Control Responses

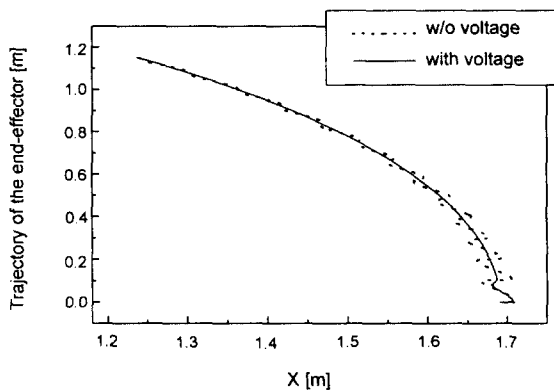


그림 3. 선단의 이동 경로  
Fig. 3. Trajectory of the end-effector

을 비교한 것으로 입력전압의 무부하시에는 유연 링크에 바람직하지 않은 진동이 발생하며, 라그랑지안 멀티플라이어도 요구 구속력을 얻을 수 없음을 알 수 있다. 압전세라믹에 입력전

압을 가할 경우 우수한 진동 제어와 또한 라그랑지안 멀티플라이어도 빠른 시간내에 요구 값에 정착하여 요구 구속력을 얻을 수 있다. Fig.3.은 로봇선단의 이동 경로를 나타낸 것으로서 입력전압의 무부하시에는 정확한 요구 경로를 추적 할 수 없었으나, 입력전압의 부하시에는 진동없이 요구 경로를 우수히 추적함을 알 수 있다.

## 5. 결론

2 링크 유연 로봇 머니플레이터의 선단위치와 구속력을 제어하기 위하여 새로운 방법을 제안하였다. 제안된 제어시스템은 두 종류의 작동기, 즉 모터와 압전세라믹으로 구성된다. 모터와 압전세라믹에 입력되는 제어토크와 입력전압을 슬라이딩 모드 제어기법을 사용하여 요구되는 선단운동과 구속력 및 유연로봇의 운동중 발생하는 바람직하지 않은 진동을 제어하였다. 제안된 제어 알고리즘은 유연 로봇 머니플레이터의 컴플라이언트 제어를 모터 토크에만 의존하는 기존의 제어알고리즘에 비하여 구성 및 설계가 간단하고, 실제 적용이 더욱 용이하다. 시뮬레이션을 통해 제안된 제어기의 성능이 우수하며 시스템의 불확실성과 외란의 존재시에도 강건함을 보였다. 현재 본 연구에서 제안된 제어 방법의 우수성을 실험적으로 입증하기 위해 2 링크 유연 로봇 머니플레이터를 제작중에 있다.

## 참고문헌

- [1] 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.
- [2] S. B. Choi and H. C. Shin, "A Hybrid Actuator Scheme For Robust Position Control of a Flexible Single-Link Manipulator," *Journal of Robotic Systems*, vol. 13(6), pp. 359-370, 1996.
- [3] H. Elmali and N. Olgac, "Sliding Mode Control with Perturbation Estimation (SMCPE): a new approach," *INT. J. CONTROL*, vol. 56, no. 4, pp. 923-941, 1992.
- [4] J. H. Fean and A. Goldenberg, "Adaptive Hybrid Control Strategies for Constrained Robots," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 38, no. 4, pp. 598-603, April 1993.
- [5] M. V. Gandhi and B. S. Thompson, *Smart Materials and Structures*, Chapman & Hall, 1992.
- [6] F. Matsuno, Y. Sakawa and T. Asano, "Quasi-Static Hybrid Position/Force Control of a Flexible Manipulator," *Proceedings of the 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Sacramento, California, April, 1991.
- [7] M. Takegaki and S. Arimoto, "A New Method for Dynamic Control of Manipulators," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 102, pp. 119-125, June 1981.
- [8] T. Yoshikawa, K. Hosoda, K. Harada, A. Matsumoto and H. Murakami, "Hybrid Position/Force Control of Flexible Manipulators by Macro-Micro Manipulator System," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 3, pp. 2125-2130, 1994.
- [9] L. S. You and B. S. Chen, "Optimal Hybrid Position/Force Tracking Control of a Constrained Robot," *International Journal of Control*, vol. 58, no. 2, pp. 253-275, 1993.
- [10] R. Y. Zhen and A. Goldenberg, "Robust Position and Force Control of Robots Using Sliding Mode," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 1, pp. 623-628, 1994.
- [11] 이혁범, 최승복, 정재천, "표면구속조건을 갖는 2 링크 유연 머니플레이터의 컴플라이언트 제어," 대한기계학회논문집, pp. 614-619, 1994.