

# 압전 작동기를 갖는 2 링크 유연 매니플레이터의 힘 및 위치 제어

°김형규\*, 최승복\*\*

## Force and Position Control of a Two-Link Flexible Manipulator with Piezoelectric Actuators

°Hyoung-Kyu Kim\* , Seung-Bok Choi\*\*

### Abstract

This paper presents a new control strategy for the position and force control of flexible manipulators. The governing equation of motion of a two-link flexible manipulator which features piezoceramic actuators bonded on each flexible beam 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 on the basis of the rigid-mode dynamics. In the controller formulation, the sliding mode controller with perturbation estimation(SMCPE) is adopted to determine appropriate control gains. The SMCPE is then incorporated with the fuzzy technique to mitigate inherent chattering problem while maintaining the stability of the system. A set of fuzzy parameters and control rules are obtained from a relation between estimated perturbation and actual perturbation. During the commanded motion, undesirable oscillation is actively suppressed by applying feedback control voltages to the piezoceramic actuators. These feedback voltages are also determined by the SMCPE. Consequently, accurate force and position control of a two-link flexible manipulator are achieved. Computer simulations are undertaken in order to demonstrate the effectiveness of the proposed control methodology.

### 1. 서론

최근 로봇 팔을 경량화 하기 위하여 유연 링크를 고려한 유연 로봇 시스템의 연구가 활발히 진행되고 있다. 현재 유연 링크를 갖는 로봇 시스템의 힘과 위치 제어에 관련된 대표적 연구로는 Matsuno et al.<sup>[1]</sup>, Yosikawa et al.<sup>[2]</sup>를 들 수 있다. 그러나 이들 연구와 탄성 로봇 팔의 진동을 억제하기 위해 지금까지 제안된 대부분의 제어기들은 모터에 입력되는 토크를 결정하는데 있어서 강체 모드 및 유한개의 탄성 모드를 동시에 고려하기 때문에 제어기의 실제 구현에 있어서 하드웨어의 신호 잡음 등과 연관되어 컴퓨터에서 계산된 토크의 정확한 입력이 용이하지 않았다. 따라서 바람직하지 않은 진동을 모터가 아닌 다른 형태의 작동기(actuator) 사용으로 제어할 수 있다면 기존의 유연 매니플레이터의 단점을 개선할 수 있다.

본 연구에서는 유연 매니플레이터의 힘 및 위치 제어를 위해 모터와 지능재료중 하나인 압전세라믹 작동기를 이용한다. 지능재료 중 감지기 및 작동기 기능을 동시에 지니고 있는 압전재료는 잘 알려진 바와 같이 압력이 가해지면 전압이 발생하고 반대로 전압이 가해지면 변형을 일으키는 특성을 갖고 있다<sup>[3]</sup>. 압전재료중 특히 압전세라믹은 압전필름에 비해 훨씬 적은 입력 전압으로 큰 힘을 발생할 수

있기 때문에 작동기로 사용하기에 적합하다. 본 논문에서는 압전재료를 특징으로 하는 2 링크 유연 매니플레이터의 운동방정식을 라그랑지(Lagrange)방법으로 유도한 후, 주어진 표면구속조건(surface constraint condition)을 관절구속조건으로 변환하고, 슬라이딩 모드 제어기를 설계한다. 그리고 제안된 슬라이딩 모드 제어 알고리즘의 효율성을 입증하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 수행한다.

### 2. 시스템 모델링

본 연구에서 고려한 2 링크 유연 매니플레이터는 Fig.1에서 보는 바와 같이 2 개의 유연 링크로 구성된 평면(planar)로봇이다. 이 그림에서 OXY 좌표는 기준 좌표계(reference coordinate)를 나타내며,  $\theta_1$  과  $\theta_2$  는 각각 첫번째와 두번째 유연 링크가 변형되지 않았을 때의 회전각을 나타낸다. 그리고  $w_i(x,t)$  는  $i$  번째의 유연 링크의  $X$  좌표축을 따라 거리  $x$  만큼 떨어진 곳에서 발생하는 탄성 변형(elastic deflection)을 나타내며, 이 탄성 변형은 모드가정법(assumed mode method)을 사용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$w_i(x,t) = \sum_{j=1}^{\infty} \phi_{ij}(x)a_{ij}(t) \quad i=1,2 \quad (1)$$

여기서 길이의 함수  $\phi_{ij}(x)$  와 시간의 함수  $a_{ij}(t)$  는 각각  $i$  번째 링크의  $j$  번째 모드의 고유 함수와 시

\* 인하대학교 기계공학과 대학원

\*\* 인하대학교 기계공학과

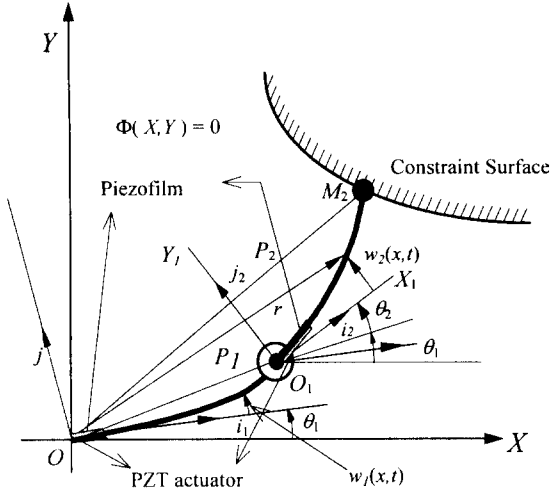


Fig.1 Two-Link Flexible Manipulator

스택의 일반화 좌표를 나타낸다.

전압  $V_i(x,t)$  에 의하여 각각의  $i$  번째 유연 링크의 표면에 부착된 작동기용 압전세라믹으로부터 발생하는 굽힘 모멘트는 축방향에 대한 힘-평형 관계로부터 중립축에 대하여 구할 수 있으며 그 결과는 다음과 같다<sup>14)</sup>.

$$M_i = -\varepsilon_c E_c t_{ic} b_i \left[ t_{if} + \frac{t_{ic}}{2} + t_{ia} - D_m \right] = c_i \cdot V_i(x,t) \quad (2)$$

$c_i$  는 굽힘 모멘트를 전압으로 나눈 것을 의미하며 제한된 링크의 기하학적 및 재료 특성에 의하여 결정된다. 그리고  $t_{ic}, t_{ia}, t_{if}$  는 각각 압전세라믹, 알루미늄 링크, 압전필름의 두께이며,  $D_m$  은 압전세라믹 및 압전필름 부착 구간의 중립축이고,  $b$  는 링크의 너비이다.  $E_c$  는 압전세라믹의 탄성 계수이다.

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

$$T = \frac{1}{2} J_1 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} J_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{w}_1'(L_1, t) + \dot{\theta}_2)^2 + \sum_{i=1}^2 \frac{1}{2} m_i \dot{p}_i^T \dot{p}_i + \sum_{i=1}^2 \frac{1}{2} \int_0^{L_i} \dot{r}_i^T \dot{r}_i (\rho_{ia} + \rho_{ic} + \rho_{if}) dx + \sum_{i=1}^2 \frac{1}{2} \int_{L_i}^{L_i} \dot{r}_i^T \dot{r}_i \rho_{ia} dx \quad (3)$$

첫번째 유연 링크의 전체 길이는  $L_1$  이며  $J_1$  은 모터 1의 관성 모멘트이며,  $J_2$  는 모터 2의 관성 모멘트이다.  $L_2$  는 두번째 유연 링크의 길이이며,  $L_i$  는 각각  $i$  번째 링크의 압전세라믹과 압전필름의 부착 구간 길이이며,  $m_i$  는  $i$  번째 링크의 선단에 고정된 선단 질량이다. 그리고  $\rho_{ia}, \rho_{ic}, \rho_{if}$  는 알루미늄 링크, 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 빔으로 가정하여 인장 및 전단 효과를 무시하면 다음과 같이 표현된다.

$$V = \sum_{i=1}^2 \frac{1}{2} \int_0^{L_i} \frac{1}{EI_A} (EI_A w_i''(x,t) - c_i \cdot V_i(x,t))^2 dx + \sum_{i=1}^2 \frac{1}{2} \int_{L_i}^{L_i} EI_B w_i''(x,t)^2 dx \quad (4)$$

여기서  $EI_A$  는 압전세라믹과 압전필름 부착구간의 유효굽힘강성이며  $EI_B$  는 나머지 구간의 유효굽힘강성이다.

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

$$V_a = \sum_{i=1}^2 -T_i(t) \cdot \theta_i(t) \quad (5)$$

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

$$\phi(\theta_1, \theta_2, w_1(L_1, t), w_1'(L_1, t), w_1(L_2, t)) = 0 \quad (6)$$

위의 구속조건에 의해 유연 매니플레이터의 선단에서의 구속력을 라그랑지안 멀티플라이어  $\lambda$  를 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$f = \sum_{i=1}^{2+n+m} J_i \lambda \quad (7)$$

여기서  $J_i$  는 Jacobian 행렬을 나타낸다. 그리고 고려되는 링크의 수는 2이며  $m$  은 첫번째 링크의 고려되는 주요 진동 모드의 수이며 두번째 링크의 주요 진동 모드의 수는  $n$  이다.

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

$$M \cdot \ddot{q} + F + K + \Delta R = B \cdot u + f + D \quad (8)$$

$$q = [\theta_1, \theta_2, a_{11}, \dots, a_{1m}, a_{21}, \dots, a_{2n}]^T$$

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & \dots & m_{1h} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{g1} & \dots & m_{gh} \end{bmatrix} \quad g, h = 2 + m + n$$

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

$$K = [0, 0, K_3(a_{11}), \dots, K_{2+m+n}(a_{2n})]^T$$

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

$$u = [T_1(t), T_2(t), V_1(t), V_2(t)]^T$$

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

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_{3(2+1)} & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & b_{3(2+m)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_{4(2+m+1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & b_{4(2+m+n)} \end{bmatrix}$$

여기서  $M$ 은 질량 행렬이고,  $F$ 는 시스템의 비선형 행렬이며,  $K$ 는 강성 행렬이며,  $\Delta R$ 은 시스템 운동방정식의 불확실성(dynamic uncertainty)을 나타내며,  $D$ 는 외부에서 시스템에 들어오는 외란항이며,  $f$ 는 선단에서의 구속력을 나타내며,  $B$ 는 입력 행렬이며  $u$ 는 제어 입력으로서 각각의 모터에 들어가는 토크와 유연 링크 표면에 부착된 압전세라믹에 들어가는 입력 전압을 나타낸다.

### 3. 제어기 설계

본 연구에서 제안된 제어 알고리즘은 각각의 허브에 장착된 모터와 각각의 유연 링크의 표면에 접착된 압전세라믹 작동기를 위한 제어 알고리즘이다. 우선 각도를 결정하기 위한 모터의 입력 결정으로 제안된 2 링크 유연 매니플레이터의 상태 변수중 유연 모드항을 고려하지 않고 강제 모드인  $\theta_i$ 만을 고려하여 제어기를 설계한다. 이러한 모터 제어 입력은 제어기 설계와 실제 구현이 용이하나 유연 링크에 외부에서 가해지는 외란과 같이 적용되어 바람직하지 않은 진동이 발생하게 된다. 이러한 진동을 제어하기 위하여 모터 제어기 설계 시 고려하지 않은 유연 모드항만을 고려하여 제어기를 설계한 후 압전세라믹에 입력 전압을 가하여 능동적으로 제어함으로써 요구 선단운동과 요구 구속력을 얻을 수 있다.

#### 3.1 모터 제어기

먼저 각 링크의 요구 각도와 선단에서의 요구 구속력을 제어하기 위한 토크를 결정하기 위하여 슬라이딩 모드 제어기를 설계한다. 이 제어기는 주어진 임의의 초기 조건에 대하여  $\theta_i$ 와  $\lambda$ 를 각각의 링크의 요구 경로와 요구 라그랑지안 멀티플라이어인  $\theta_{id}$ 와  $\lambda_d$ 를 추적하는 것이므로 다음과 같은 슬라이딩 서피스를 설계한다.

$$s_k = \sum_{i=1}^2 \left( c_{k(2i-1)} e_{2i-1} + c_{k(2i)} e_{2i} \right) + J_k \int_0^t (\lambda_d - \lambda) dt \quad (9)$$

$$e_{2i-1} = \theta_i - \theta_{id}, e_{2i} = \dot{\theta}_i - \dot{\theta}_{id} \quad k = 1, 2$$

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 추적 오차는 점근적으로 영이 될 것이다. 이것은 다음과 같은 슬라이딩 모드 존재 조건을 만족함으로써 성취할 수 있다.

$$\dot{s}_k \cdot s_k < 0 \quad (10)$$

조건(10)을 만족시키기 위하여 다음과 같은 슬라이딩 모드 제어기를 제안한다.

$$u_k = -\sum_{i=1}^2 c_{k(2i-1)} e_{2i-1} + F_k - J_k \cdot \lambda_d - k_k \cdot \text{sgn}(s_k) \quad (11)$$

여기서  $k_k$ 는 불연속 게인이다.

일반적으로 기존의 슬라이딩 모드 제어기의 불확실성이나 외란에 대한 강건성을 보장하기 위한 불연속 게인을 결정하는 방법은 몇 가지의 단점을 가지고 있다. 우선 설계자가 외란이나 불확실성의 경계값들에 대한 사전 지식이 있어야 하며, 이러한 방법으로 설계된 불연속 게인  $k$ 는 과도하게 설계되곤 했다. 이것은 실제 시스템에 적용 시 불확실성이나 외란의 경계값들을 안다는 것이 쉽지 않고 또한 과도하게 설계된 제어기의 입력에 의해 바람직하지 않은 제어 진동이나 작동기에 무리를 주거나 빠른 추적 제어 성능을 초래할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 외란이나 불확실성을 관측하여 그 관측된 값에 비례하여 불연속 게인을 결정하는 즉, 외란이나 불확실성의 경계값들에 대한 정보가 필요 없는 SMCPE(sliding mode controller with perturbation estimation)를 사용하였다<sup>[5]</sup>.

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

$$\begin{aligned} & \left[ \Psi_1(t)_{act}, \dots, \Psi_{2+m+n}(t)_{act} \right]^T \\ & = \Delta M \cdot \ddot{q} + \Delta F + \Delta K - D \\ & = -M \cdot \ddot{q} - F - K + u(t) + J \cdot \lambda \end{aligned} \quad (12)$$

일반적으로 요구 경로와 요구 구속력을 동시에 제어 시에는 보통 시스템의 운동 속도가 느리므로 시스템의 운동 속도가 느리다는 가정하에서 불확실성의 변화 또한 느리다고 가정할 수 있으므로 다음과 같이 관측할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \left[ \Psi_1(t)_{est}, \dots, \Psi_{2+m+n}(t)_{est} \right]^T \\ & = -M \cdot \ddot{q} - F - K + u(t - \delta) + J \cdot \lambda \end{aligned} \quad (13)$$

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

$$\begin{aligned} u_k & = -\sum_{i=1}^2 c_{k(2i-1)} e_{2i-1} + F_k - J_k \cdot \lambda_d - k_k \cdot \text{sgn}(s_k) \\ & \quad + \Psi_k(t)_{est} \end{aligned} \quad (14)$$

그러나 위와 같이 설계된 슬라이딩 모드 제어기는 미분 제어 요소만을 포함하게 된다. 잘 알려진 바와 같이 미분 제어 요소는 오차 신호 자체에 대하여 동작하는 것이 아니라 변화율에 따라 증가하므로 미분 제어 요소만으로는 결코 우수한 위치 제

어 효과를 얻을 수 없다. 따라서, 제어기에 비례 제어 요소를 결합하여 제어기를 설계하면 다음과 같다.

$$u_k = -P \cdot s_k - \sum_{i=1}^2 c_{k(2i-1)} e_{2i} + F_k - J_k \cdot \lambda_d - k_k \cdot \text{sgn}(s_k) + \Psi_k(t)_{est} \quad P > 0 \quad (15)$$

식(15)의 제어기에 의해 슬라이딩 서피스의 동적 거동은 다음과 같이 된다.

$$\dot{s}_k = -P \cdot s_k - k_k \cdot \text{sgn}(s_k) + \Psi_k(t)_{est} - \Psi_k(t)_{act} \quad (16)$$

따라서, 다음을 만족하는 불연속 게인  $k_k$ 를 구하면 슬라이딩 모드 존재 조건(10)을 만족시킬 수 있다.

$$[k_k]^T = \left[ \eta_k \cdot |\Psi_k(t)_{est}| \right]^T \geq \left[ |\Psi_k(t)_{est} - \Psi_k(t)_{act}| \right]^T \quad \eta_k > 0 \quad (17)$$

실제적인 제어기 구현에 있어서 불연속 제어기는 하드웨어에 악영향을 미치는 떨림 현상(chattering)을 발생하므로 바람직하지 않다. 이 문제의 해결을 위하여 정해진 경계 영역 내에서 불연속 제어기를 연속 제어기로 근사화 할 수 있다.

### 3.2 압전 작동기 제어기

앞 절에 모터 제어기에 입력되는 제어 입력은 시스템의 유연 모드항이 고려되지 않은 것으로 운동 시 유연 링크에 필연적으로 바람직 하지 않은 진동이 발생한다. 이러한 진동을 능동적으로 제어하기 위하여 유연 링크의 표면에 부착된 압전세라믹 작동기의 입력 전압을 슬라이딩 모드 제어기를 사용하여 결정한다.

$$s_v = \sum_{j=1}^{n+m} \left( c_{v(2j-1)} e_{(2j-1)} + c_{v(2j)} e_{2j} \right) \quad (18)$$

$$e_{2j-1} = a_j - a_{jd} \quad , \quad e_{2j} = \dot{a}_j - \dot{a}_{jd} \quad v = 3, 4$$

알맞은 슬라이딩 서피스의 기울기  $c_{v(2j-1)}, c_{v(2j)}$ 를 설계하여 슬라이딩 모드 존재 조건을 만족하는 제어기를 설계하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u_v = \frac{1}{b_{vv}} \left[ - \sum_{j=1}^{m+n} c_{v(2j-1)} e_{2j} + F_v + K_v - k_v \cdot \text{sgn}(s_v) \right] \quad (19)$$

$$b_{vv} = \int_0^l c_i \cdot \frac{\partial^2 \phi_{ij}(x)}{\partial x^2} dx$$

이와 같이 설계된 제어기를 SMCPE를 이용하여 다시 설계한 후 모터 제어기와 마찬가지로 비례 제어 요소를 결합하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u_v = \frac{1}{b_{vv}} \left[ -P \cdot s_v - \sum_{j=1}^{m+n} c_{v(2j-1)} e_{2j} + F_v + K_v - k_v \cdot \text{sgn}(s_v) + \Psi_v(t)_{est} \right] \quad (20)$$

따라서, 슬라이딩 모드 존재 조건 (10)과 같은 식을 만족하는 불연속 게인  $k_v$ 을 구하면 다음과 같다.

$$[k_v]^T = \left[ \eta_v \cdot |\Psi_v(t)_{est}| \right]^T \geq \left[ |\Psi_v(t)_{est} - \Psi_v(t)_{act}| \right]^T \quad \eta_v > 0 \quad (21)$$

### 3.3 퍼지 제어기

슬라이딩 모드 제어기에서는 일반적으로 불연속 게인  $k$ 를 외란의 크기에 비례하는 값을 갖도록 선택한다. 그러나 관측된 외란값에 비례하여 불연속 게인을 설계하는 SMCPE에서는 슬라이딩 모드 존재 조건을 보장하는  $\eta$ 값의 결정이 중요시된다.  $\eta$ 값을 작게 하면 보다 적은 제어 입력으로 효과적인 제어를 수행할 수 있으나 시스템의 표본 시간을 매우 작게 설정하여 그에 따른 하드웨어의 시간 지연(time delay)등이 발생하며 고가의 주변장치가 필요하게 된다. 또한  $\eta$ 값을 크게 하면 강건한 시스템의 안정성을 보장할 수 있으나 기존의 SMC 처럼 상대적으로 높은 제어 입력이 인가되어서 떨림 현상을 유발할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여  $\eta$ 값을 결정하기 위하여 퍼지 방법(fuzzy technique)을 이용하여 새로운 형태의 퍼지 슬라이딩 모드 제어기(FSMCPE:fuzzy-sliding mode controller with perturbation estimation)를 구성한다.

FC(fuzzy control)를 실제로 적용할 때, 최초로 문제가 되는 것은 제어기의 설계, 즉 퍼지 제어 규칙을 어떻게 설정하는가 하는 점이다 이를 위해 SMCPE의 관측되는 외란 값에서 FC의 언어적 규칙을 나타내는 다음과 같은 조건문을 얻을 수 있다.

If  $|\Psi(t)_{est}|$  is far from than 1 then the bigger feedback gain and vice versa (22)

이러한 언어적 규칙을 갖는 FC를 설계하기 위하여 관측된 외란값과 외란값의 변화율에 대한 정보를 나타내는 변수를 다음과 같이 정의한다.

$$\alpha = \Psi(t)_{est} \quad , \quad \beta = \Psi(t)_{est} - \Psi(t - \delta)_{est} \quad (23)$$

이와 같이 정의된  $\alpha$ 와  $\beta$ 의 값을 퍼지화시킨 변수를 각각  $s$ 와  $cs$ 로 규정하고 이를 다음과 같이 다섯가지로 분할한다.

$$s = \{NB, NS, ZO, PS, PB\} \\ cs = \{NB, NS, ZO, PS, PB\} \quad (24)$$

식(22)를 실행하기 위한 FC의 입력 변수는 위와 같이 정하며, 제어 변수는 다음과 같이 정한다.

$$\eta_f = \{ZO, P1, P2, P3, P4, P5, P5\} \quad (25)$$

여기서  $\eta_f$ 는  $\eta$ 를 퍼지화시킨 변수이며,  $P5, P4, P3, P2, P1, ZO$ 는  $\eta$ 의 퍼지값을 나타낸다. 여기서 퍼지값이 모두 양수인 이유는 슬라이딩 모드 존재 조건(10)을 만족시키기 위해서이다. 퍼지 제어기 설계 방식은 각 상태의 특징적인 점을 골라 그 곳에서 어떤 제어를 하면 좋겠는가를 기술하게 된다. 우선 관측된 외란값과 외란값의 변화율이 적으면서 양수이면 이것은  $\alpha = PS, \beta = PS$ 와 같은 퍼

지 변수의 값을 이용하여 기술된다. 따라서, 이 부근에서는  $\eta$ 의 값을 매우 적게 하여  $\eta_f = P2$ 의 값을 갖도록 한다. 마찬가지로 하여 변화하는 각각의 상태를 주목하여 제어 규칙을 구성하면 다음과 같다.

- IF  $s$  is PB and  $cs$  is PB, THEN  $\eta_f$  is P5  
 IF  $s$  is PS and  $cs$  is PB, THEN  $\eta_f$  is P4  
 IF  $s$  is PS and  $cs$  is PS, THEN  $\eta_f$  is P2  
 ⋮ ⋮ ⋮

이와 같이 두 언어적 변수  $s$ 와  $cs$ 에 의하여 관측된 외란값과 실제 외란값의 변화를 나타낼 수 있으며, 이에 의해서 적절한 되먹임 계인의 크기를 결정하게 하는 FC를 설계할 수 있다. 식(26)과 같이 표현되는 25개의 제어 규칙을 표로 나타내면 Table 1과 같다.

Table 1. Linguistic fuzzy rule base for feedback gain

$\beta \backslash \alpha$	PB	PS	ZO	NS	NB	
PB	P5	P4	P3	P4	P5	PB:Positive Big
PS	P4	P2	P1	P2	P5	PS:Positive Small
ZO	P3	P1	ZO	P1	P3	ZO:Zero
NS	P4	P2	P1	P2	P4	NS:Negative Small
NB	P5	P4	P3	P4	P5	NB:Negative Big

이와 같은 퍼지 제어 규칙의 추론은 Li와 Lau<sup>[6]</sup>가 제안한 추론법을 사용하여 추론이 가능하다.

이제 앞 절에서 SMCPE를 이용해 설계한 불연속 계인 (17)과 (21)을 FC와 합성시켜 FSMCPE를 구성할 수 있다. FSMPE에 의해 설계된 불연속 계인 값을 나타내면 다음과 같다.

$$[k_k]^T = [\eta_{kf} \cdot |\Psi_k(t)_{est}|]^T \geq [|\Psi_k(t)_{est} - \Psi_k(t)_{act}|]^T \quad (27)$$

$\eta_{kf} > 0$

$$[k_v]^T = [\eta_{vf} \cdot |\Psi_v(t)_{est}|]^T \geq [|\Psi_v(t)_{est} - \Psi_v(t)_{act}|]^T \quad (28)$$

$\eta_{vf} > 0$

고정된  $\eta$ 값을 갖고 있는 SMCPE에 비해 FSMCPE는 퍼지 추론으로부터 생성된 적용 명령에 따라서  $\eta_{kf}, \eta_{vf}$ 가 시간에 따라 변화되는 특성을 가지고 있다.

### 3.4 앞먹임 제어기

제안된 시스템에서 사용된 모터 1,2가 감속기 부착된 감속기 일체형으로 가정하면 모터의 운동시 감속기에서 발생하는 마찰을 고려해야 한다. 이 연구에서 고려하는 마찰력은 불연속적으로 변하는 Coulomb 마찰로써 시스템의 제어 성능에 나쁜 영향을 초래할 수 있다. 그러나 Coulomb 마찰력은 비교

적 정확한 모델링이 가능하기 때문에 피드포워드(feedforward)제어 입력으로 보상할 수 있다. 따라서 슬라이딩 모드 제어기(15)는 시스템의 불확실성에 대해서만 고려하여 설계하였고, 모터내에서 발생하는 Coulomb 마찰력이 고려되지 않은 시스템 모델로부터 구해진 것이므로, 이 Coulomb 마찰력을 고려한 피드포워드 제어 입력  $u_F$ 를 추가하면 모터에 인가되는 전체 제어 입력  $u_{kF}$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$u_{kF} = u_k + u_F \quad (29)$$

여기서  $u_F = -F_i \cdot \text{sgn}(\dot{\theta}_i)$ 이며  $F_i$ 는 Coulomb 마찰력의 크기이다.

## 4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

제안된 제어 알고리즘의 우수한 제어 성능을 고찰하기 위하여 선단 질량은 0.01kg으로 설정하였고 컴퓨터 시뮬레이션에 사용된 유연 링크들과 압전재료의 성분을 Table 2에 나타내었다. 본 연구에서는 유연 매니퓰레이터가 작업하는 환경을 직선 표면 구속 조건으로 선택하였다. 이에 따른 구속 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Phi(X_p, Y_p) = Y_p + AX_p = B \quad (30)$$

본 논문에서는 주요 진동 모드  $m, n$ 을 각각 1차 모드까지 고려하였다. 여기서  $a_{11}, a_{21}$ 이  $\theta_1$ 에 비해 상당히 작다고 가정하여 무시하면 구속 방정식(31)에 의해  $\theta_2$ 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.<sup>[7]</sup>

$$\theta_2 = \Omega(\theta_1) \quad (31)$$

작업 환경  $A, B$ 를 각각 1.5와 1.0으로 정하였으며, 한편 요구 라그랑지안 멀티플라이어  $\lambda_d$ 는 1.5, 요구 경로  $\theta_{1d}$ 는  $1.0 - 0.1 \times \text{time}[\text{rad}]$ 로 정하였다. 유연 링크의 선단과 작업 환경과의 마찰은 없다고 가정한다. 제안된 제어 알고리즘의 강건성을 입증하기 위하여 운동방정식의 불확실성을 30%로 고려하여 시뮬레이션을 수행 하였다.

Table 2. Dimensional and mechanical properties of the aluminum links and piezoelectric materials

	Link1	Link2	Piezo-film1	Piezo-film2	Piezo-ceramic1	Piezo-ceramic2
Young's modulus[Gpa]	65	65	2	2	64	64
Thickness[mm]	3	0.8	0.05	0.05	3	0.8
Density[kg/m <sup>3</sup> ]	2890	2890	1780	1780	7700	7700
Width[mm]	80	50	80	50	80	50
Length[m]	0.6	0.5	0.15	0.15	0.15	0.15
Moment of inertia [J1]						1.0 kgm <sup>2</sup>
Moment of inertia [J2]						0.1 kgm <sup>2</sup>
Piezoelectric strain constant of piezoceramic						-300×10 <sup>-12</sup> (m/m)/(V/m)

Fig.2는 압전세라믹에 입력 전압의 부하시와 무부하시의 응답을 비교한 것으로 입력 전압의 부부하 시에는 유연 링크에 바람직하지 않은 진동이 발생하며, 라그랑지안 멀티플라이어도 요구 구속력을 얻을 수 없음을 알 수 있다. 압전세라믹에 입력 전압을 가할 경우 우수한 진동 제어와 또한 라그랑지안 멀티플라이어도 빠른 시간 내에 요구 값에 정착하여 요구 구속력을 얻을 수 있다. Fig.3은 매니플레이터 선단의 이동 경로를 나타낸 것으로서 입력 전압의 무부하시에는 정확한 요구 경로를 추적할 수 없었으나, 입력 전압의 부하시에는 진동 없이 요구 경로를 우수히 추적함을 알 수 있다.

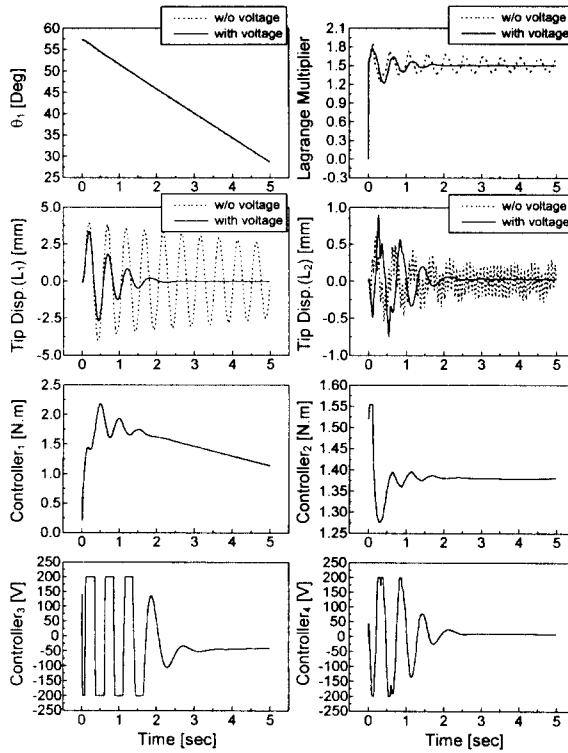


Fig. 2 Comparison of control responses

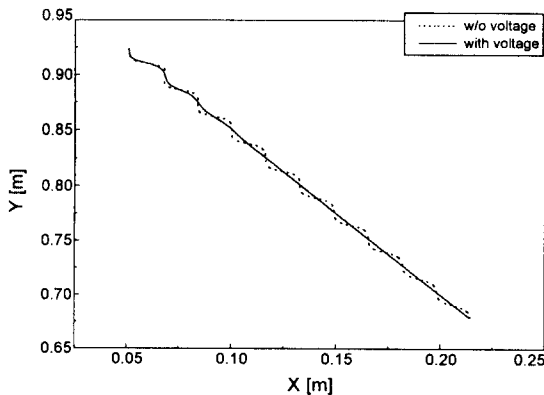


Fig.3 Trajectory of the end-effector in the X-Y plane

## 5. 결론

유연 매니플레이터의 선단 위치와 구속력을 제어하기 위하여 새로운 방법을 제안하였다. 모터와 압전세라믹에 입력되는 제어 토크와 입력 전압을 슬라이딩 모드 제어 기법을 적용하여 요구되는 선단 운동과 구속력, 그리고 유연 매니플레이터의 운동 중 발생하는 바람직하지 않은 진동을 제어하였다. 제안된 제어 알고리즘은 유연 매니플레이터의 힘 및 위치 제어를 모터 토크에만 의존하는 기존의 제어 알고리즘에 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 매니플레이터를 제작 중에 있다.

## 참고문헌

- [1] Matsuno F., Sakawa Y. and Asano T., "Quasi-Static Hybrid Position/Force Control of a Flexible Manipulator," Proceedings of the 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Sacramento, California, 1991.
- [2] Yoshikawa T., Hosoda K., Harada K., Matsumoto A. and Murakami H., "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.
- [3] Gandhi M. V. and Thompson B. S., Smart Materials and Structures, Chapman & Hall, 1992.
- [4] Choi S. B. and Shin H. C., "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.
- [5] Elmali H. and Olgac N., "Sliding Mode Control with Perturbation Estimation (SMCPE): a new approach," INT. J. CONTROL, vol. 56, no. 4, pp. 923-941, 1992.
- [6] Li, Y. F. and Lau, C. C. "Development of Fuzzy Algorithms for Servo Systems," IEEE, Control Syst. Mag, Vol. 9, No. 3, pp. 66-72, 1989.
- [7] Choi S. B., Lee H. B., Thompson B. S., "Compliant Control of a Two-link Flexible Manipulator by Constraint Hamiltonian System," Mechanism and Machine Theory, 1997. (to be appeared).