Proceedings of the 12th
KACC, October 1997

스마트 작동기를 이용한 갠트리형 유연로봇팔의 위치 제어

Position Control of a Flexible Gantry Robot Arm Using Smart Actuators

°한상수*, 최승복*

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

Abstract: This paper presents new feedback actuators to achieve an accurate position control of a flexible gantry robot arm. The translational motion in the plane is generated by two d.c.motors and controlled by employing electro-rheological(ER) clutch actuators. The generated motion can be continuously controlled by controlling the intensity of electric field imposed to the ER fluid domain which tunes the transmitted torque of the ER clutch. On the other hand, during control action of the translational motion a flexible arm attached to the moving mass produces undesirable oscillations due to its inherent flexibility. The oscillations are actively suppressed by applying feedback voltages to piezoceramic actuators bonded on the surface of the flexible arm. The control electric fields to be applied to the ER clutch and the control voltage for the piezoceramic actuator are determined via the loop shaping design procedures(LSDP) in the H_∞ control technique. Consequently, an accurate position control at the end-point of the flexible arm is achieved during planar motion.

Keywords: Flexible Gantry Robot Arm, ER Clutch Actuator, Piezoceramic Actuator, LSDP H_∞ Control

1. 서론

기존 대부분의 갠트리형 로봇 시스템은 X-Y 위치 제어를 위하여 서보 모터(servo motor) 작동기를 사용하고 있으며, 작업을 수행하는 로봇팔은 기계적 강성으로 인한 구조적 진동을 최소화하기 위하여 큰 무게와 부피를 갖는 강체로 구성되어져 있다. 이는 제어로직 구성상의 용이한 점은 있으나, 경제적 측면과 효율성에 있어 많은 단점을 낳고 있다. 즉, 운동 구동장치로서 고가의 서보 모터를 사용해야 하고, 작업용 로봇팔의 큰 무게와 부피로 인하여 로봇의 운전 속도를 느리게 하며 가반 중량(payload)을 적게 만들어 성능 저하를 초래한다. 따라서 이러한 문제점들에 대한 해결안으로 본연구에서는 기존의 서보 모터 작동기가 아닌 일반 직류 모터(d.c. motor)와 ER 클러치로 구성된 새로운 형태의 위치 제어 작동기를 제안하였고, 로봇팔의 경량화 및 효율 증대를 위하여 유연 로봇팔을 제안하였다. 현재 유연 로봇팔의 진동 제어에 관한 활발한 연구가 진행되고 있으나, 지금까지 제안된 대부분의 제어기들은 강체모드(rigid mode) 및 유한개의 탄성모드(elastic mode)를 동시에 고려하기 때문에[1] 제어기의 실제 구현에 있어서 하드웨어의 신호잡음등과 연계되어 컴퓨터에서 계산된 제어입력의 정확한 적용이 용이하지 않았다. 이러한 측면에서 볼 때, 강체 로봇 제어의 경우와 같이 탄성모드를 고려하지 않고, 알맞은 제어 전기장을 ER 클러치에 공급함으로써 얻어지는 전달 토오크를 이용하여 X-Y 평면상의 위치 제어를 수행하는 것이 바람직하다. 그리고 X-Y 방향의 운동 중 유연 로봇팔에서 발생하는 바람직하지 않은 진동은 위치 제어 작동기가 아닌 압전세라믹(piezoceramic) 작동기를 이용하여 제어할 수 있다면 위에서 언급한 바와 같은 유연 로봇팔을 위한 제어기가 갖고 있는 단점을 개선할 수 있다[2]. 압전세라믹은 잘 알려진 바와 같이 압력이 가해지면 전압이 발생되고 반대로 전압이 가해지면 변형을 일으키는 특성을 갖고 있는 지능재료(smart material)의 하나로서[3], 본 연구에서는 유연 로봇팔의 진동 제어를 위한 작동기(actuator)로서 이를 사용하였고, 동일한 특성을 지녔으나 유연성을 갖고 있는 압전필름(혹은 polyvinylidene PVDF)을 감지기(sensor)로하여 능동적인 진동 제어를 수행하였다. 또한 위치 제어 작동기로서는 전기유동유체(Electro-rheological Fluid, 이하 ER 유체)를 이용한 ER 클러치를 제안하였고, 이 작동기를 X-Y 축에 각각 장착하여 독립적인 제어를 통해 다양한 형태의 요구 궤적에 대한 추적 제어가 가능하도록 하였다.

한편, 본 연구에서 제안된 제어시스템은 마찰력 등의 외란과 모델링 과정에서 발생하는 필연적인 불확실성이 존재하므로 시스템의 성능과 안정성을 보장하기 위해 대표적인 현대 강건제어 이론의 하나인 H_∞ 제어 기법을 도입하였으며, 나아가 설계과정이 간단하고 가중함수(weighting function)의 선정이 용이한 H_∞ 루우프형상 기법(Loop Shaping Design Procedure)[4]을 이용하여 제어기를 설계하였다. 마지막으로, X-Y 평면상의 위치 추적 제어와 유연 로봇팔의 진동 제어에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행함으로써 제안된 스마트 작동기의 효용성과 H_∞루우프형상 기법의 강건성과 성능을 입증하였다.

2. 시스템 모델링

2.1. 갠트리형 로봇의 모델링

본 연구에서 고려된 유연 로봇팔을 갖는 갠트리형 로봇의 형태는 그림 1 의 (a)에 보는 바와 같다. X-Y 방향으로의 자유로운 운동이 가능하도록 고안된 이송부에 압전세라믹 작동기와 압전필름 감지기가 부착된 유연 로봇팔을 장착하였다. 직교하고 있는 2 개의 shaft 는 각각 X 축과 Y 축에 연결되어 있고, 각 축은 직류 모터, ER 클러치 및 볼스크류를 이용한 직선운동 메카니즘에 의해 독립적으로 위치제어를 수행한다. 제안된 유연 로봇팔의 길이는 L 이며, 압전세라믹과 압전필름이 부착된 구간의 길이는 l_1 으로 설정하였고, 그림 1 의 (b)에서 보는 바와 같이 운동방정식을 유도하기 위하여 각각 2 개의 좌표계를 도입하였다. 우선 기준축으로부터 shaft 축 방향으로 x (또는 y)축을 설정하였고, Or 은 이송부 중심에서 보의 중립축에 접선으로 설정된 좌표축이다. 따라서, 좌표축 Or 을 따라 거리 r 만큼 떨어진 위치에서의 전체 변위는 이송부의 위치 $x(t)$ 와 로봇팔의 탄성 변위 $w(r,t)$ 의 합으로 다음과 같이 표현되어질 수 있다.

$$u(r,t) = x(t) + w(r,t) \tag{1}$$

전압 $V(r,t)$ 에 의하여 압전세라믹 작동기로부터 발생하는 굽힘 모멘트 M_l 는 축방향에 대한 힘-평형관계로부터 보의 중립축에 대하여 구할 수 있으며, 그 결과는 다음과 같다.

$$M_l = -\varepsilon_c E_c t_c b\left[t_l + \frac{t_c}{2} + t_a - d_n\right] = c \cdot V(r,t) \tag{2}$$

여기서, ε_c 는 전압공급 시 압전세라믹에서 발생하는 변형률이며, E_c 는 압전세라믹의 탄성계수이고, b 는 유연 로봇팔의 너비이다. t_c, t_l, t_a 는 각각 압전세라믹, 압전필름, 유연 로봇팔에 사용된 알루미늄의 두께이며, d_n 은 압전세라믹 및 압전필름 부착구간의 중립축이다. 그리고 c 는 굽힘모멘트를 전압으로 나눈 것을 의미하며, 제안된 유연 로봇팔의 재료 및 기하학적 특성에 의하여 결정된다. 또한 전압 $V(r,t)$ 는 압전세라믹이 r 축에 대하여 기하학적으로 일정한 형태를 갖는 경우 시간 t 만의 함수로 생각할 수 있다. 결국, 제안된 유연 로봇팔의 인장 및 전단 효과를 무시하여 Euler-Bernoulli 빔(beam) 이론을 적용하면 다음과 같이 x (또는 y)방향의 운동 에너지와 변형에 의한 위치 에너지를 얻을 수 있다.

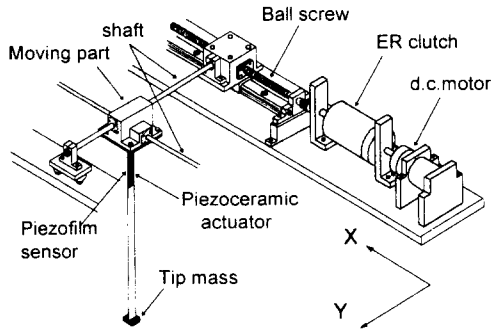


그림 1 (a). 스마트 작동기를 갖는 갠트리형 로봇
Fig.1 (a) The Gantry Robot with Smart Actuators

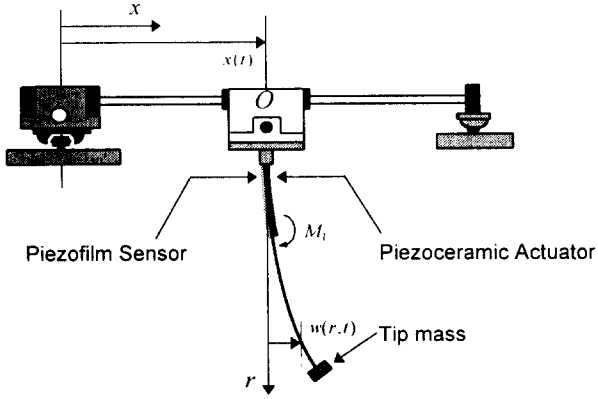


그림 1 (b).압전 작동기와 감지기를 갖는 유연 로봇팔
Fig1 (b). A flexible robot arm with surface-bonded piezoceramic actuator and piezofilm sensor

$$T_k = \frac{1}{2}\left[\int_0^{l_1}\rho\left(\frac{\partial u(r,t)}{\partial t}\right)^2 dr + \int_{l_1}^{l}\rho_a\left(\frac{\partial u(r,t)}{\partial t}\right)^2 dr + m_t\left(\frac{\partial u(r,t)}{\partial t}\right)^2\Big|_{r=l} + M_s\dot{x}(t)^2\right] \quad (3)$$

$$V_e = \frac{1}{2}\left[\int_0^{l_1}\frac{1}{EI}\left(EI\left(\frac{\partial^2 u(r,t)}{\partial r^2}\right) - c\cdot V(t)\right)^2 dr + \int_{l_1}^{l}E_aI_a\left(\frac{\partial^2 u(r,t)}{\partial r^2}\right)^2 dr\right] \quad (4)$$

여기서 ρ 와 EI 는 각각 압전재료 부착구간에서 유연 로봇팔의 단위길이 당 유효 질량과 유효 굽힘강성이고, ρ_a 와 E_aI_a 는 각각 나머지 구간의 단위길이 당 질량과 굽힘강성이며, m_t 는 유연 로봇팔에 장착된 선단 질량이다. 또, M_s 는 유연 로봇팔과 선단 질량을 제외한 X 방향으로 운동하는 모든 질량을 포함한다.

X-Y 방향의 운동구동 메카니즘에 대한 해석을 위해 우선 그림 2 와 같은 볼스크류의 운동역학을 고려한다. ER 클러치를 통하여 직류모터로부터 전달된 토오크에 의해 볼스크류 축이 회전하면서 이송부에는 그림 2 에서 보는 바와 같은 X(또는 Y)축 방향의 힘 F_a 와 원주방향의 힘 F_r 이 작용하게 된다. 볼스크류에 작용하는 힘-평형 관계로부터 축방향 힘 F_a 와 원주방향 힘 F_r 사이의 관계는 다음 식과 같이 표현되어 진다.

$$F_a(t) = \frac{1}{\tan(\Phi+\varphi)}F_r(t) \quad (5)$$

여기서, Φ 와 φ 는 각각 볼스크류축의 리이드각과 마찰각을 의미한다. 한편, 직류 모터와 ER 클러치에 의해 구동되어지는 이송부의 지배방정식은 다음과 같이 얻어진다.

$$J_t\cdot\frac{d^2\theta}{dt^2} + C_{clutch}\cdot\frac{d\theta}{dt} = T(t) - r\cdot F_a(t) - \tau_{friction} \quad (6)$$

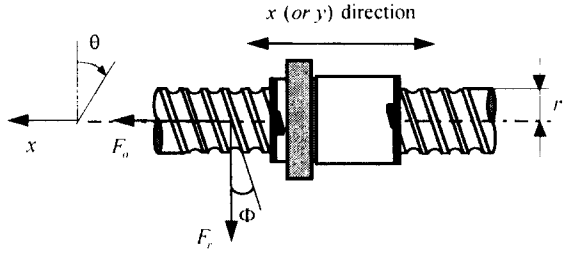


그림 2. 볼스크류의 운동 역학
Fig 2. Mechanism of ball screw

여기서, J_t 는 ER 클러치 외부 실린더, 볼스크류, 커플링의 극관성 모멘트인 J_{clutch_outer}, J_{bs}, $J_{coupling}$ 의 합을 의미하고, C_{clutch} 는 ER 클러치에서의 점성감쇠계수이다. 식(6)의 우변에 표현된 $\tau_{friction}$ 은 이송시스템의 각 구성요소에서 발생하는 마찰 토오크로서 시스템에 존재하는 외란(disturbance)으로 간주할 수 있다. 한편, 그림 2 의 x 방향 변위 $x(t)$ 와 원주방향의 각변위인 $\theta(t)$ 는 다음 관계식으로 주어진다.

$$\theta(t) = \frac{2\pi}{l}x(t) \quad (7)$$

여기서, l 은 볼스크류의 리이드이다.

이제 시스템의 전체 운동 방정식을 유도하기 위하여, 우선 식(1)에서 유연 로봇팔의 탄성변형 $w(r,t)$ 를 모드가정법(assumed mode method)을 통해 다음과 같이 나타낸다.

$$w(r,t) = \sum_{i=1}^{\infty}\phi_i(r)\cdot q_i(t) \quad (8)$$

여기서, 길이의 함수 $\phi_i(r)$ 와 시간의 함수 $q_i(t)$ 는 각각 i 번째 모드의 고유함수와 시스템의 일반화 좌표이다. 식(8)을 이용하고, 두 에너지식 (3)과 (4)를 라그란지 방정식(Lagrange's equation)에 대입한 후, 감쇠항을 첨가한다. 그리고 상기한 식(5).(6).(7)을 고려하면, 다음과 같은 X-Y 테이블과 유연 로봇팔의 운동에 대한 비연계 상미분 방정식을 구할 수 있다.

$$\left\{m_t + \frac{2\pi\cdot J_t}{rl\tan(\Phi+\varphi)}\right\}\cdot\ddot{x}(t) + \frac{2\pi\cdot C_{clutch}}{rl\tan(\Phi+\varphi)}\cdot\dot{x}(t) = \frac{T(t)}{r\tan(\Phi+\varphi)} + D(t)$$

$$\ddot{q}_i(t) + 2\zeta_i\omega_i\dot{q}_i(t) + \omega_i^2 q_i(t) = \frac{\phi_i'(l_1)}{m_{ii}}\cdot M_s\ddot{x}(t) + d_i(t) \quad (9)$$

두 방정식의 우변에 보인 외란 $D(t)$ 와 $d_i(t)$ 는 다음과 같다.

$$D(t) = -\left\{\sum_{i=1}^{n}m_i\cdot\ddot{q}_i(t) + \frac{\tau_{friction}}{r\tan(\Phi+\varphi)}\right\}$$

$$d_i(t) = -\frac{m_i}{m_{ii}}\cdot\ddot{x}(t) \quad for\ i = 1,2,3,\cdots,n \quad (10)$$

여기서, $m_i = \int_0^{l_1}\rho\phi_i(r)dr + \int_{l_1}^{l}\rho_a\phi_i(r)dr + m_t\phi_i(L)$ 이며, 일반화 질량 m_{ii} 는 $\int_0^{l_1}\rho\phi_i^2(r)dr + \int_{l_1}^{l}\rho_a\phi_i^2(r)dr + m_t\phi_i^2(L)$ 로 주어진다. 즉, $D(t)$ 는 유연 로봇팔의 진동으로 인한 영향과 시스템에 존재하는 마찰력으로 인해 이송부에 작용하는 외란을 의미하고, $d(t)$ 는 이송부의 운동시 발생하는 가속도로 인해 유연 로봇팔에 가해지는 외란을 의미한다. 그리고 식(9)에서 m_t 는 X(또는 Y)방향으로 운동하는 모든 요소의 질량을 나타내며, ζ_i 와 ω_i 는 각각 유연 로봇팔의 i 번째 모드 감쇠계수와 고유진동수를 의미한다. 또한 제어 입력 $T(t)$ 는 ER 클러치를 통하여 조절되어지는 토오크로서, 이는 다음 절에서 기술하도록 한다.

2.2. ER 클러치 작동기의 모델링

본 논문에서 제안된 ER 클러치는 ER 유체를 이용하여 요구되는 토오크를 전달하는 작동기로서, ER 유체는 다음과 같은 빙햄 특성(Bingham property)으로 표현되어 진다.

$$\tau_{ER} = \eta\dot{\gamma} + \tau_y(E) \quad (11)$$

여기서, τ_{ER} 은 외부에서 가해지는 전단응력에 저항하는 ER 유체의 전단응력이며, η 는 ER 유체의 점성계수, $\dot{\gamma}$ 은 전극에 대한 유체의 전단속도비를 의미한다. 또한 $\tau_y(E)$ 는 ER 유체의 전기장 인가시 발생하는 항복응력을 나타낸다. 이는 인가되는 전기장의 세기 E 에 대해 지수함수의 관계를 갖으며 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\tau_y(E) = \alpha E^{\beta} \quad (12)$$

여기서, α 와 β 는 ER 유체의 고유치로서 용매의 종류,베이스 오일의 점도, ER 유체 제조시 사용된 입자의 종류, 중량비 및 수분 함유량, ER 유체의 온도 등에 따라 달라진다. 본 논문에서 채택한 ER 유체는 점도가 30cs 인 트랜스포머(transformer)오일을 베이스 오일로 하고 입자는 크기가 26-88μm 인 아라빅 검(arabic gum)이며, 시뮬레이션에 사용한 α 와 β 의 값은 각각 66.98 과 1.19 이다. ER 클러치의 경우, 동력이 전달되는 요인으로 유체의

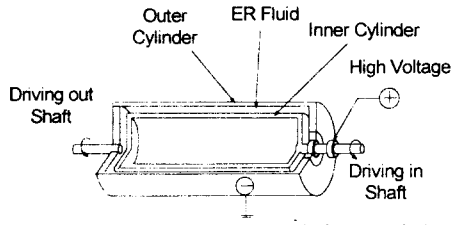


그림 3. ER 클러치 작동기의 구조
Fig.3. Schematics of ER Clutch Actuator

점성 및 마찰등에 의한 영향보다는 전기장 부하에 따른 ER 유체의 항복전단응력으로 볼 수 있으므로 ER 클러치에 의해 전달되어지는 토오크는 다음 식과 같이 근사적으로 표현할 수 있다.

$$T(t) = 2\pi \cdot r_c^2 \cdot l_c \cdot \tau_{ER} = 2\pi \cdot r_c^2 \cdot l_c \cdot \alpha E^{\beta}(t) \tag{13}$$

여기서, r_c 와 l_c 는 각각 ER 클러치 내부 실린더의 반경과 길이이다. 그리고, ER 클러치의 반응 속도를 고려한 모델의 전달함수는 다음과 같다.

$$\frac{T(s)}{E^{\beta}(s)} = \frac{2\pi \cdot r_c^2 \cdot l_c \cdot \alpha}{\tau_c s + 1} \tag{14}$$

본 연구에서 제안된 ER 클러치 작동기의 구조는 그림 3 과 같다.

3.제어기 설계

본 연구에서는 가중함수의 선정이 용이하고, 불확실성 모델링을 고려하는 H_∞ 루우프형상 기법을 이용하여 제어기를 설계하였다. 특히, 시스템에 존재하는 불확실성(uncertainty)을 보다 광범위한 섭동을 포함할 수 있고, H_∞ 노옴(norm)의 반복적인 계산이 필요치 않은 잇점을 지닌 coprime factor 로 모델링하였다. 본 논문에서 제안한 X-Y 테이블과 유연 로봇팔의 전달함수 G_1, G_2 는 각각 다음과 같다.

$$G_1(s) = \frac{X(s)}{E^{\beta}(s)} = \frac{2\pi \cdot r_c^2 \cdot l_c \cdot \alpha \cdot l}{(\tau_c s + 1) \cdot (J_{eq} \cdot s^2 + 2\pi \cdot C_{clutch} \cdot s)} = \tilde{M}_1^{-1} \tilde{N}_1$$
$$G_2(s) = \frac{w(L,s)}{V(s)} = \frac{\sum_{i=1}^{n} c \cdot \phi_i(L) \cdot \phi_i'(l_1) / m_{ii}}{\sum_{i=1}^{n} (s^2 + 2\zeta_i \omega_i s + \omega_i^2)} = \tilde{M}_2^{-1} \tilde{N}_2 \tag{15}$$

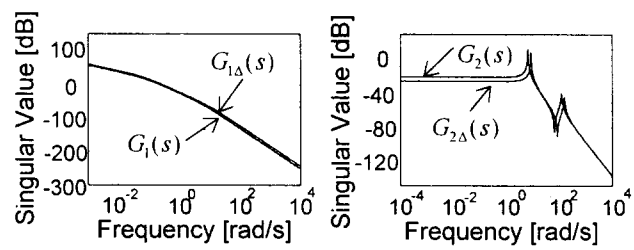
여기서, $J_{eq} = rl\tan(\Phi + \varphi) \cdot m_7 + 2\pi \cdot J_7$ 이다. 이제 식(15)의 공칭 플랜트(nominal plant)에 coprime factor 불확실성을 가산한 섭동 플랜트(perturbed plant)를 구성하면 아래와 같다.

$$G_{1\Delta} = (\tilde{M}_1 + \Delta_{M_1})^{-1}(\tilde{N}_1 + \Delta_{N_1})$$
$$= \frac{2\pi \cdot r_c^2 \cdot l_c \cdot \alpha \cdot l}{((\tau_c + \Delta\tau_c)s + 1) \cdot \{(J_{eq} + \Delta J_{eq}) \cdot s^2 + 2\pi \cdot (C_{clutch} + \Delta C_{clutch}) \cdot s\}}$$
$$G_{2\Delta} = (\tilde{M}_2 + \Delta_{M_2})^{-1}(\tilde{N}_2 + \Delta_{N_2}) \tag{16}$$
$$= \frac{\sum_{i=1}^{n} c \cdot \phi_i(L) \cdot \phi_i'(l_1) / m_{ii}}{\sum_{i=1}^{n} \{s^2 + 2\zeta_i(\omega_i + \Delta\omega_i)s + (\omega_i + \Delta\omega_i)^2\}}$$

이때, $[\Delta_M, \Delta_N] \in RH_\infty$, $\|\Delta_M, \Delta_N\|_\infty < \varepsilon$ 을 만족한다. 여기서, ε 은 불확실성의 최대 허용 경계치를 나타낸다. 즉, $\varepsilon > 0$ 에 대하여 섭동 플랜트 G_Δ 를 안정화시킬 수 있는 제어기 K 가 존재한다면, 공칭 플랜트 G 는 안정도 여유(stability margin) ε 을 갖으며, 안정화가 가능하다고 할 수 있다. 그림 4 는 본 연구에서 제안한 시스템의 공칭 플랜트 G 와 섭동 플랜트 G_Δ 에 대한 특이치 선도를 나타낸다. 식(16)에서 보는 바와 같이 시스템에 존재하는 불확실성으로서 ER 클러치 작동기의 시상수, 극관성 모멘트, 점성마찰계수와 유연 로봇팔에서의 고유진동수에 대한 섭동을 고려하였으며, 각각의 값들에 대해 ±30 %의 변화를 갖는 섭동 플랜트를 구성하였다. 이러한 섭동 하에서 견실 안정성과 성능을 보장하기 위하여 이송 테이블과 유연 로봇팔에 대하여 각각 다음과 같은 가중함수를 선정하였다.

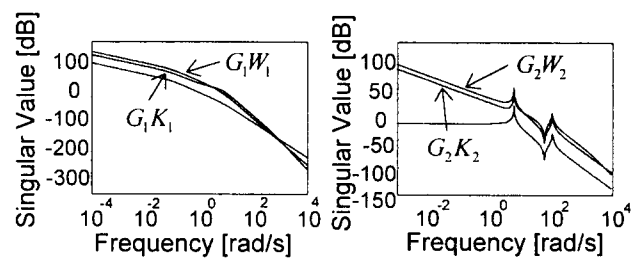
$$W_1 = 45 \times \frac{10}{s + 80}, \quad W_2 = 30 \times \frac{s + 7}{s + 0.00001} \tag{17}$$

가중함수는 가능한 한 제어기의 차수를 줄일 수 있도록 1 차로 선정하였으며, 저주파수 영역에서 큰 이득을 갖고 고주파수 영역에서는 적은 이득을 갖게 함으로써 요구되는 강건성과 성능 사양을 만족하도록 하였다. 이때, ε 의 값은 각각 0.2754 와 0.3532 로 얻어졌다. 따라서, 이 지수로부터 그림 5 에서 알 수 있는 바와 같이 원하는 형상으로의 성공적인 루우프 형상화가 이루어졌음을 알 수 있다. 그림 6 은 이러한 루우프 형상화에 의해 얻어진 이송 테이블과 유연 로봇팔의 감도함수(sensitivity function) 및 보조 감도함수(complementary sensitivity function)에 대한 특이치 선도를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 저주파수 영역에서 감도함수는 낮은 이득을 갖게함으로써 성능 사양을 만족하도록 하였고, 고주파수 영역에서 보조 감도함수의 이득을 낮게 조정하여 식 (10)과 같이 주어지는 외란 및 마찰력 등의 모델링되지 않은 외란에 대하여 강건한 안정성을 갖도록 하였다. 앞서 언급한 바와 같이 이송 시스템에 존재하는 관성 모멘트, 점성마찰계수, ER 클러치 작동기의 시상수에 대한 섭동과 유연 로봇팔의 고유 진동수에 대한 섭동에 대해서도 안정화된 결과를 보이도록 하였다. 그림 7 은 곱셈형 불확실성에 대한 특이치 선도를 나타낸다. 저주파수 영역에서는 이송 시스템과 유연 로봇팔 모두 100%의 변수 섭동을 포함할 수 있음을 알 수 있고, 교차주파수(cross over frequency) 영역에서도 각각 대략 57%와 64%의 섭동에 대해 강건한 안정성을 가짐을 알 수 있다.



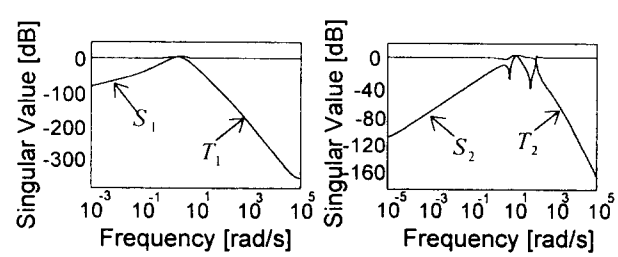
(a) Moving table (b) Flexible arm

그림 4. 제안된 시스템의 특이치 선도
Fig. 4. Singular Value Plots of Proposed System



(a) Moving table (b) Flexible arm

그림 5. 루우프 이득과 루우프 형상화된 시스템의 특이치 선도
Fig. 5. Singluar Value Plots of Loop Gains and Shaped Plants



(a) Moving table (b) Flexible arm

그림 6. 감도함수 및 보조감도함수 선도
Fig. 6. Sensitivity and Complementary Sensitivity Plots

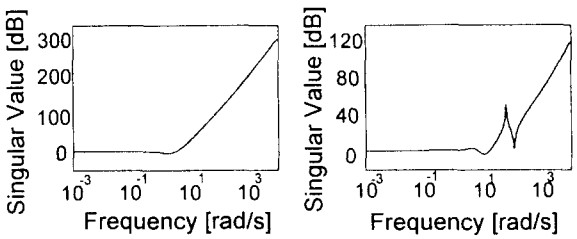


그림 7. 곱셈형 불확실성의 특이치 선도
Fig. 7. Singular Value Plots of Multiplicative Uncertainty

4. 제어 결과 및 고찰

설계된 제어기의 성능을 입증하기 위하여 표 1 과 같이 주어지는 물리적 및 기하학적 특성을 갖는 이송 시스템과 유연 로봇팔을 고려하였다. 그림 8 은 이송 시스템의 한쪽 축을 20 초의 시간 간격을 두고 0.25m 의 거리를 전/후진시켰을 때 공칭 플랜트와 섭동 플랜트에 대한 제어 결과를 나타낸다. 직류모터에 의해 발생된 일정한 크기의 토오크는 ER 클러치에 인가되는 제어 전기장에 의해 요구점에 도달하기 위한 알맞은 토오크로 조절되어 볼스크류를 구동하게 된다. 그림에서 보는 바와 같이 유연 로봇팔에 부착된 압전 세라믹에 제어 전압을 입력하지 않는 경우, 이송부가 요구점에 도달한 후에도 계속해서 잔여 진동이 존재하는 것을 볼 수 있다. 그러나, 되먹임 신호에 의해 제어 전압이 인가되는 경우 빠른 시간 내에 진동을 억제할 수 있음을 알 수 있다. 그림 9 는 X-Y 평면상에서 이송부가 타원운동을 하도록 요구 궤적을 설정하였을 경우의 추적 제어 결과를 나타낸다. 그림 8 의 경우와 마찬가지로, 압전 세라믹에 되먹임 전압이 가해지는 경우, 이송부가 요구 궤적에 대한 추적을 수행하는 동안 유연 로봇팔에 발생하게 되는 진동을 효과적으로 억제할 수 있음을 볼 수 있다.

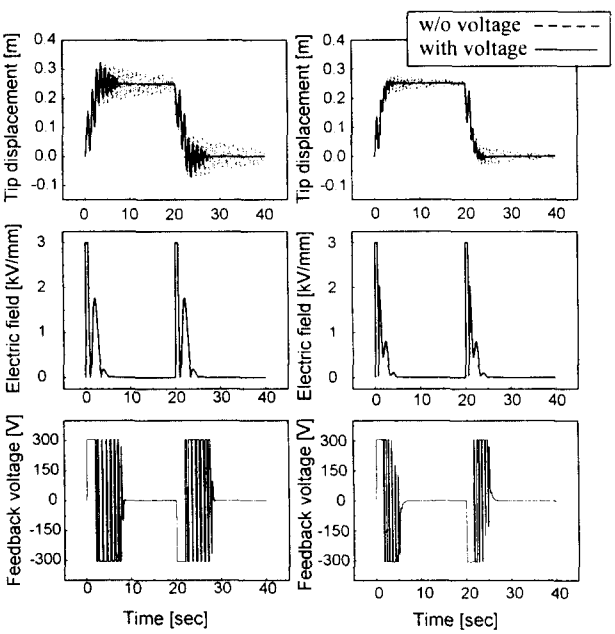


그림 8. 위치 제어 결과
Fig. 8. Position Control Response

5. 결론

본 논문에서는 갠트리형 유연 로봇팔의 능동적인 위치 제어를 위하여 새로운 형태의 작동기를 제안하였다. 우선 제안된 갠트리 로봇의 X-Y 위치 제어를 위해, 기존의 서보 모터가 아닌 ER 유체를 이용한 ER 클러치와 일반 직류 모터를 결합한 새로운 형태의 작동기로 효과적인 제어 결과를 얻었으며, X-Y 평면상의 운동 중 유연 로봇팔에서 발생하는 바람직하지 않은 진동을 압전 세라믹 작동기와 압전 필름 감지기를 이용하여 능동적으로 제어할 수 있었다. 또한, 루우프 형상 기법을 이용한 H_∞ 제어기를 설계하고 시뮬레이션을 수행함으로써, 시스템의 불확실성과 외란에 대해 강건하고 우수한 제어 성능을 입증하였다. 현재 본 연구에서 제안된 스마트 작동기와 제어 방법의 우수성을 실험적으로 검증하기 위해 유연 로봇팔을 갖는 갠트리형 로봇을 제작중에 있다.

표 1. 이송 시스템과 유연 로봇팔의 물리적, 기하학적 특성
Table. 1 Dimensional and Mechanical Properties of the Moving System and Flexible Robot Arm

	Aluminum link	Piezoceramic	Piezofilm
Young's Modulus	65 GPa	64 GPa	2 GPa
Thickness	1 mm	0.815 mm	0.052 mm
Density	2890 kg/m^3	7700 kg/m^3	1780 kg/m^3
Width	25 mm	25 mm	25 mm
Length	0.5 m	0.18 m	0.18 m
Total moment of inertia of moving system[J_T]			1.8774 × 10^{-3} kgm^2
Total mass of moving system [M_X]			4.11295 kg
Tip mass [m_T]			0.2 kg
lead of ball screw			0.01 m/rev
ER Clutch inner cylinder length[l_C]			0.15 m
ER Clutch inner cylinder radius[r_C]			0.034 m
Piezoelectric strain constant of piezoceramic		-300 × 10^{-12}(m/m)/(V/m)	

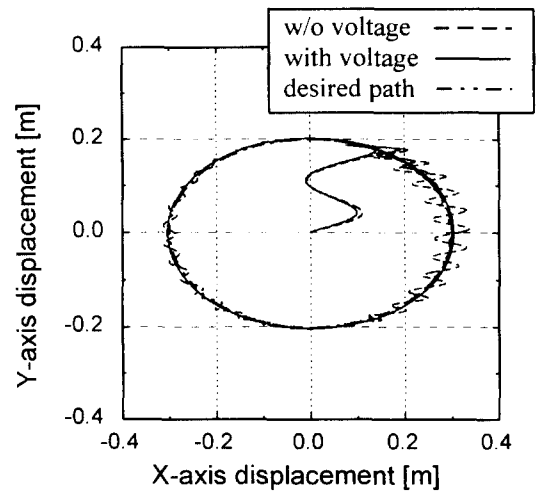


그림 9. 추적 제어 결과
Fig. 9. Tracking Control Response

참고 문헌

[1] E. Schmitz. "Experiments on the Endpoint Position Control of a Very Flexible One-Link Manipulator." Ph.D Thesis, Dept. of Aeronautics and Astronautics, Standford University, 1985.

[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] M. V. Gandhi and B. S. Thompson, *Smart Materials and Structures*, Champson & Hall, 1992.

[4] D. C. McFarlane and K. Glover, "A Loop Shaping Design Procedure Using H_∞ Synthesis," *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol.37, No. 6, pp.759-769, 1992.