

PID 제어기에 의한 소형 로봇용 그리퍼의 힘 제어

이재정*, 홍동표**

PID Force Control of a miniature robot Gripper

Jae-Jeong Lee*, Dong-Pou Hong**

Abstract

This paper is concerned with the theoretical and experimental study on the force control of a miniature robotic gripper. The gripper is an uniform flexible cantilever equipped with a distributed set of compact force sensor. As an actuator, piezoelectric actuator is fixed with copper plate at which the beam is clamped. The mathematical model of the assembled electro-mechanical system is developed. The force sensor is described by a set of concentrated mass-spring system. The formulated equations of motion are applied to the study of a control problem where the gripper is commanded to grip an object. The usefulness of the PID control technique is verified by experiment.

Keywords : Force Sensor(힘 센서), PID Control(PID 제어), Robot gripper(로봇 그리퍼) Electro-mechanical system(전기 기계 장치), Copper plate(구리 보), Mass-spring system(질량스프링 시스템), Piezoelectric Actuator(압전 액츄에이터)

1. 서론

산업이 급격히 발전됨에 따라 공장 자동화가 추진되고, 인간을 대신하여 위험부담이 있는 현장, 오염된 지역에서 작업, 작업 빈도가 높은 작업, 우주 구조물 작업, 하드 디스크의 입력장치, 자동차 서스펜션, 에너지 절약을 위한 작업을 수행하는 로봇의 그리퍼와 로봇 팔의 역할이 증대되어 왔다. 로봇트를 이용하는 목적은 사람을 대신하여

일하는 기능 외에 사람이 할 수 없는 정밀한 작업까지 해내는 것이다. 따라서, 로봇트를 정밀화, 소형화, 고속화시키는 일은 이 분야에 있어서 가장 중요한 일이다. 지금까지의 연구는 로봇트의 파지기구(gripper)를 강제로 가정하여 제어하는 것에 집중되어 왔으며, 이러한 경우는 로봇트 팔의 중량을 필요 이상 크게해야 되며, 이로인한 로봇트 팔에 미치는 관성력 또한 무시할 수 없게 되었다. 관성력이 커지게 되면 로봇트 파지기구(gripper)의

* 전북대학교 대학원

** 전북대학교 정밀기계과

목적하는 위치로 정확하고 신속하게 움직일 수가 없게 된다. 이러한 파지기구(gripper)들은 로봇트를 소형화, 정밀화 하는데 큰 장애가 되고있다. 그리고 Tsuneo Yoshi-kawa와 Kiyoshi Nagai⁽¹⁾에 의해서 개발된 파지기구(gripper)도 강체 마다로 손가락들을 만들어 이를 servo motor로 구동하기 때문에 역시 무겁고 제어방법에 여러 가지 어려움들을 안고 있다. Seiji Chonan⁽²⁾과 그 연구팀들에 의한 연구는 payload가 없을 경우엔 tracking에 문제가 발생한다. 즉 입력을 따라가는 팔의 끝점 위치에 오차가 발생한다. Yang과 Lee⁽³⁾는 압전 액츄에이터를 가진 단면보의 자유진동해석을 하였는데, 압전 액츄에이터 보의 길이비와 두께비에의하여 일정한 보의 경우보다도 고유진동수가 증가되어 감을 알게되었다. Baz와 Pho⁽⁴⁾는 외팔보에 압전액츄에이터를 사용하여 능동제어 알고리즘을 제시하였다. 최근에 Liu와 Yang⁽⁵⁾은 성공적으로 압전 액츄에이터를 회전하는 유연보의 제어에 이용하였다. Pota와 Alberts⁽⁶⁾는 압전 액츄에이터와 센서를 가진 회전하는 보시스템의 정확한 전달함수를 얻는 방법에 관하여 연구하였다. 로봇의 연구개발에 따라 로봇핸드의 고기능화와 초정밀화가 점점 요구되고 있다. 특히, 장차 반도체 생산공정이나 생체공학과 의학관련분야에서는 유연하고 부스러지기 쉬운 작은 물체를 파지할 필요성이 생기며, 살아있는 생물을 잡는 경우에 살아 있도록 순상을 주지않고 물체를 잡을 필요가 있다. 이와같은 고기능화와 초정밀화를 위한 액츄에이터로서 압전소자는 소자의 질량에 비하여 발생력이 크고 힘의 반복성이 좋고, 내열성이있는 특징을 가진다. 본 연구에서는 로봇트 그리퍼(gripper)를 제어함에 있어서 위치 제어법에 힘 제어법을 혼합하는 hybrid 제어법으로 이런 문제점을 해결한다. 로봇 그리퍼 기구의 해석모델을 설정한 다음 지배 방정식을 확립하고, 그리퍼 기구의 끝점(end point)과 대상물 사이에 작용하는 접촉력과, 그리퍼 기구 끝점의 위치를 피드백 신호로 하여 그리퍼 기구의 힘과 위치 제어이론을 확립하고, 이 결과에 따라 그리퍼 기구의 제어법을 연구한다. 로봇 그리퍼 기구 및 압전소자를 구동하기 위한 구동장치를 제작하여, 구동장치는 컴퓨터를 이용하여 제어하고, 힘과 변위 데이터를 센서로부터 받아 분석하기 위한 제어 프로그램을 개발하여 그리퍼 기구의 구동 제어법을 연구하고자 한다.

2. 이론해석

인간의 손은 감각점이 다수 분포되고 있어, 각 점의 힘

의 정보에 의해 미세한 힘제어가 가능하다. 그러나, 인간의 감각을 실험하기 위해서는 다수의 미소 센서가 필요하며, 센서의 수가 많을수록 실험 시스템이 복잡하다.

2.1 운동방정식

두개의 finger가 대상물과 접촉한 상태로의 그리퍼 기구의 모델은 Fig.1 이다. 그리퍼의 finger는 각각 finger1, finger2로 한다. finger i ($i=1,2$)의 고정단을 원점 O로 잡고, 정지 위치에 따른 finger i ($i=1,2$)의 수평방향에 x 축을 잡고 수직 방향에 y ($i=1,2$)축을 잡는다. finger i ($i=1,2$)부분은 $0 \leq x \leq a$ 의 사선부가 압전 소자(밀도 ρ_b^i , 단면적 A_b^i , 종탄성계수 E_b^i 및 단면 2차 모오멘트 I_b^i) $a \leq x \leq l$ 의 부분이 구리(밀도 ρ_b^i , 단면적 A_b^i , 종탄성계수 E_b^i 및 단면 2차 모오멘트 I_b^i)로 된다. 대상물과 힘센서의 총질량은 끝점질량이며, 센서의 강성은 스프링상수 K_s 이다.

그리퍼의 매트릭스 운동방정식은

$$M\ddot{F}(t) + \Gamma \dot{F}(t) + KF(t) = QM_b(t) \quad (1)$$

여기서,

$$M = \begin{bmatrix} M_s & 0 \\ 0 & M_a \end{bmatrix}, \quad \Gamma = \begin{bmatrix} \Gamma_s & 0 \\ 0 & \Gamma_a \end{bmatrix}, \quad K = \begin{bmatrix} K_s & 0 \\ 0 & K_a \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$Q = \begin{bmatrix} Q_s \\ Q_a \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} F_s \\ F_a \end{bmatrix}$$

식(1)을 연속시간계의 상태방정식으로 표시하면

$$\dot{x}(t) = A_c x(t) + B_c M_b(t) \quad (3)$$

$$y(t) = C_c x(t)$$

여기서,

$$x(t) = \begin{bmatrix} F(t) \\ \dot{F}(t) \end{bmatrix}, \quad A_c = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1} & -M^{-1}\Gamma \end{bmatrix}, \quad B_c = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}Q \end{bmatrix}$$

$$y(t) = [F_s(t) \quad y_2(l, t)]^T$$

$$C_c = \begin{bmatrix} 0 \dots 0 & 2K_s W_{a1}^M \dots 2K_s W_{aN}^M & 0 \dots 0 & 0 \dots 0 \\ W_{s1}^M \dots W_{sm}^M & -W_{a1}^M \dots -W_{aN}^M & 0 \dots 0 & 0 \dots 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

그리퍼의 매트릭스 표시의 운동방정식은

$$\begin{bmatrix} F_s(t) \\ y_2(t, t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \dots 0 & 2K_s W_{a1}^u \dots 2K_s W_{aN}^u & 0 \dots 0 & 0 \dots 0 \\ W_{s1}^u \dots W_{sm}^u & -W_{a1}^u \dots -W_{aN}^u & 0 \dots 0 & 0 \dots 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\times \begin{bmatrix} [f_{s1}(t) \dots f_{sN}(t)]^T \\ [f_{a1}(t) \dots f_{aN}(t)]^T \\ [f_{s1}(t) \dots f_{sN}(t)]^T \\ [f_{a1}(t) \dots f_{aN}(t)]^T \end{bmatrix}$$

finger 1 및 finger 2를 디지털 구동계로 구동 제어하여, 연속시간계의 입력 $M_p(t)$ 를 샘플링 주기 T로 일정하게 나누고 0차 근사를 사용하여 이산화 한다. 이 경우 식(3)는

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + BM_p(k), \\ y(k) &= Cx(k) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서,

$$A = \exp[A_c T], \quad B = \int_0^T \exp[A_c \tau] d\tau B_c, \quad C = C_c \quad (7)$$

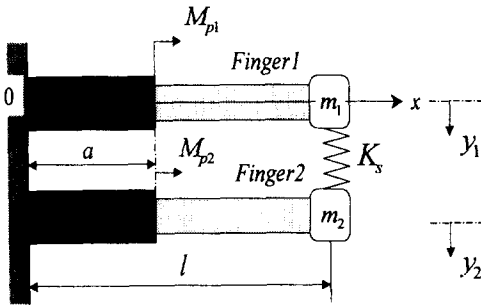


Fig.1 Gripper model

3. 그리퍼 시스템

3.1 그리퍼 시스템 특성

Table 1는 실험에 사용한 그리퍼 기구의 물성치를 표시한다. 현재 상용되고 있는 센서는 소형인데도 측정 범위가 Kg중 이라서, 이와 같은 센서로 수 g중의 미소한 힘은 측정이 불가능하다. 그래서, 미소한 힘을 측정 가능한 센서를 제작했다. 힘 센서는 구리판(길이 10mm, 폭6mm, 두께 0.1 mm)을 사용하여, 고감도 반도체 스트레인 게이지를 부착 하였고, 베이스로서는 고무(길이 10mm, 폭 6mm, 두께 3mm)를 사용하였다.

힘 센서의 반도체 스트레인 게이지는 KYOWA KSP-2-E4를 사용했다. 힘 센서에 하중을 부하 또는 제하하여 출력전압을 특성 측정했다. 이 결과는 Fig.2 이다. 0 ~ 0.098N (0 ~ 10g중)의 하중에 대한 센서의 출력 전압이며, 부하 또는 제하시 5회씩 측정을 했다. 부하 또는 제하시에 실험성이 있으며, 수 g중의 미소한 힘의 측정이 가능함을 알수 있었다. 하중 W와 출력전압 V_{out} 의 관계는

$$V_{out} = k_{sensor} W \quad (8)$$

$k_{sensor} = 50.404$ N/V로 된다.

Table 1 Physical parameters of gripper

Properties	Copper beam	Piezoelectric cell
Length(m)	36.2×10^{-3}	31.8×10^{-3}
Width(m)	6.0×10^{-3}	12.0×10^{-3}
Thickness(m)	0.3×10^{-3}	0.65×10^{-3}
Density(kg/m ³)	8.67×10^{-3}	8.3×10^{-3}
Yong rate(N/m ²)	102.5×10^{-3}	58.03×10^{-3}
Damping constant(s)	3.5587×10^{-3}	
End mass(kg)	0.585×10^{-3}	
Sensor mass(kg)	0.295×10^{-3}	
Spring constant(N/m)	9.542×10^{-3}	

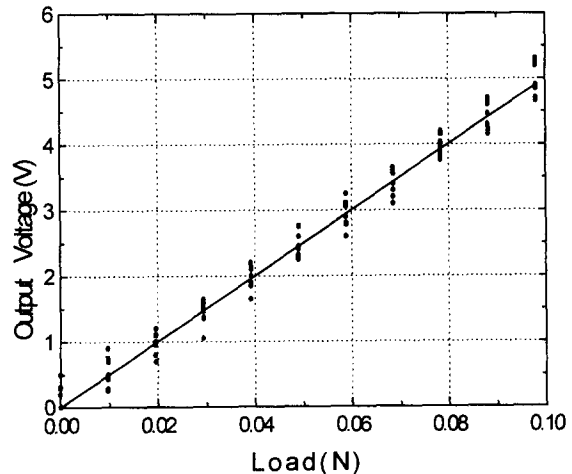


Fig.2 Charateristic of load and output blotage.r

3.2 그리퍼 시스템 구성

실험에 사용한 그리퍼 장치의 개략도는 Fig.3 이다. 본

장치는 그리퍼의 유연 핑거로 구성하는 기구부, 그리퍼 끝점의 힘을 측정하는 힘 센서, finger 2의 끝점 변위를 측정하는 레이저 변위계, 2개의 센서의 출력신호 전달에 사용하는 Pre-Amp, 압전소자 구동에 사용하는 Power Amp 및 센서의 정보를 기록 계산하여 제어 입력을 발생하는 제어부(A/D 변환기, 컴퓨터, D/A 변환기)로 구성된다. 잡는힘은 Finger 1의 끝점에 부착시킨 힘 센서에 의해 측정하며, Finger 2의 끝점 위치는 레이저 변위계(KEYENCE LD 2500; 분해능 0.5 μ m)에 의해 측정하였다. 센서 출력은 Pre-Amp로 증폭후 A/D 변환기(ADTEK AB-98-05A; 분해능: 12bit, 출력: 8ch, 변환시간: 25 μ sec/ch)로 아날로그 디지털 변환을 하여, 각 샘플링 주기 마다 퍼스널 컴퓨터(NEC PC-9801 VX; CPU:80286, 수치계산 80287)에 보내 제어입력을 계산한다. 연산결과는 D/A 변환기(Interface 98DA12(4); 분해능 12bit, 출력 4ch., 변환시간 5 μ sec/ch)에 의해 $\pm 5V$ 의 아날로그 신호에 변환시킨 Power Amp로 보낸다. Power Amp에서 증폭된 신호는 압전소자에 가하여 Finger 1 및 Finger 2가 구동된다.

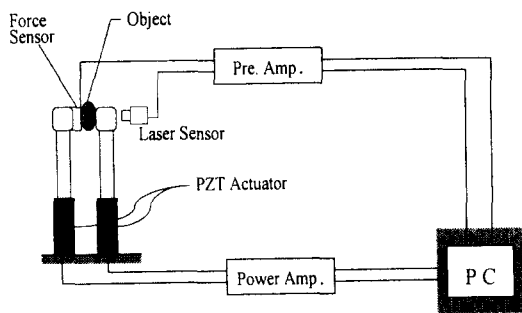


Fig.3 Gripper experimental setup

4. 그리퍼 실험

4.1 그리퍼 PID 실험

대상을 잡는 힘을 finger1에 부착한 접촉력 센서로 측정하고, 이와 동시에 finger2 변위를 레이저 변위계에 의해 측정한다. 각각의 신호를 Pre-Amp로 증폭후 A/D 변환기에서 디지털 신호로 변환하여 샘플링 주기 마다 컴퓨터에 입력한다. 제어입력을 연산하여 연산결과를 D/A 변환기로 전압신호로 변환 후, 2개의 압전소자에 가해 그리퍼 기구를 구동한다.

실험의 제어신호는

$$V^{ic} = g_{pl}[V_{d_j} - V_{s_j}(i)] + g_{vl}[(V_{d_j}(i) - V_{d_j}(i-1)) - (V_{s_j}(i) - V_{s_j}(i-1))] + \frac{1}{2} g_{lj} \sum_{k=0}^i [V_{d_j}(k) - V_{s_j}(k) + V_{d_j}(k-1) - V_{s_j}(k-1)],$$

$$j=1,2 \quad (9)$$

여기서, V_{d_j} 및 V_{s_j} 를 힘의 목표치 및 실제 잡는힘으로 되며, g_{pl} , g_{vl} 및 g_{lj} 를 각각 비례, 미분 및 적분 feedback gain으로 한다.

4.2 그리퍼 PID 실험결과

그리퍼 기구의 미소 잡는힘과 변위 제어문제에 디지털 PID제어를 적용한 경우에 실험을 수행하였다. 실험에서 샘플링 주기는 2msec로 하였다. 잡는힘에 대해서는 목표치 $F_d = 0.01N$ 으로 일정하게 하고 선단 변위에 대해서는 목표치 $y_d = 0$ 로 일정하게 유지 하고자 하였다. 이 경우 목표치를 step 입력 응답으로 부터 얻은 지정극에 대하여, PID gain을 결정한다. 그리퍼 기구는 작은 대상물이나 파괴되기 쉬운 대상물을 잡을 목적으로, 잡는힘의 overshoot O_s 을 1%의 작은 값으로 설정한다. 잡는힘 및 변위는 신속히 목표치에 도달하게 정정시간 t_s 는 0.1 sec로 한다. 여기서, 정정시간 t_s 는 목표치의 $\pm 0.5\%$ 의 범위에 도달한 시간으로 한다. 이 조건에 의해 지정극 P_a 는 $0.089 \pm 0.065 j$ 로 한다. 이 지정극에 가깝게 PID gain은

$$G_{p1} = 2.0, G_{v1} = 0.09, G_{l1} = 0.37, G_{p2} = 5.0, G_{v2} = 0.01, G_{l2} = 6.0 \quad (10)$$

로 결정한다. PID gain에 의해 폐루프계의 극은 $0.88 \pm 0.066 j$ 로 한다.

Fig.4는 실험결과 그리퍼가 PID제어로 금속 육각 볼트 (3.26g)을 잡은 결과이다. 실험결과 잡는힘의 오버슈트는 15% 정도이며, 잡는힘이 목표 위치에 도달하기 까지 0.5sec로 매우 신속하게 되었으며, 그 이후에는 매우 안정하게 잡게됨을 알 수 있었다.

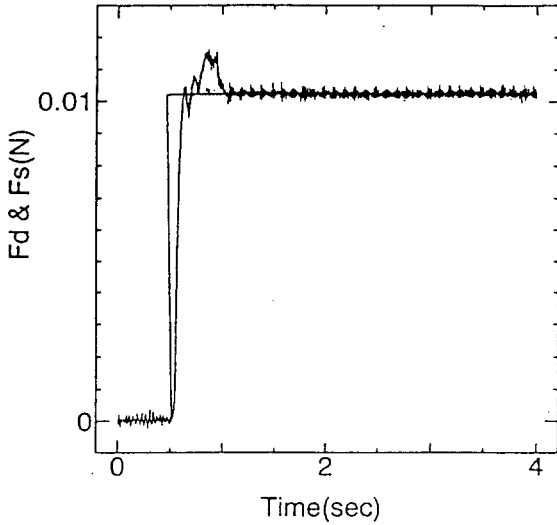


Fig.4 Force response by pid control

Fig.5는 선단 변위도 0.5mm의 목표치에 0.5sec후에 는 안정하게 유지됨을 알수 있었다.

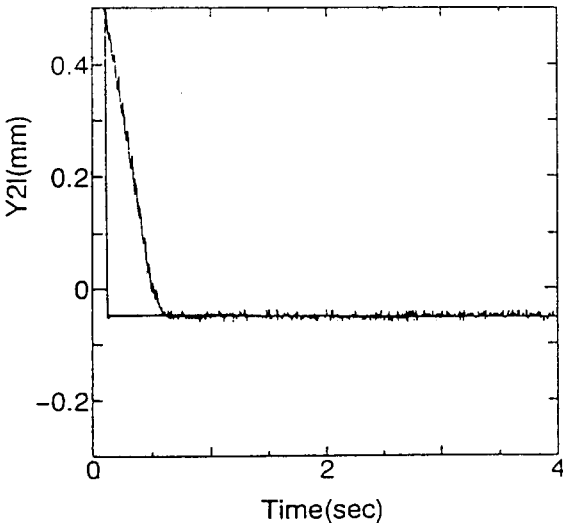


Fig.5 Displacement response by pid control

Fig.6 레이저 센서로 부터의 변위 신호를 FFT 분석기

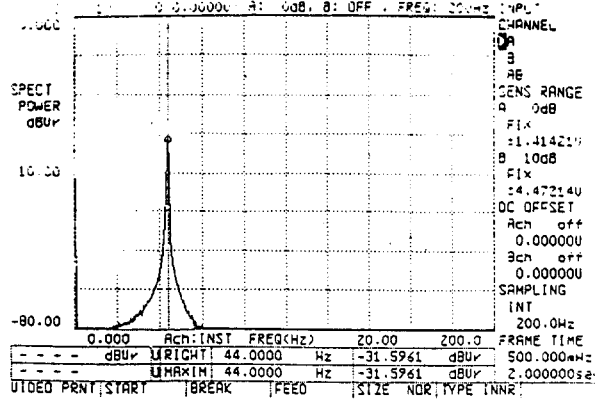


Fig.6 (a) Spectrum of gripper by impulse

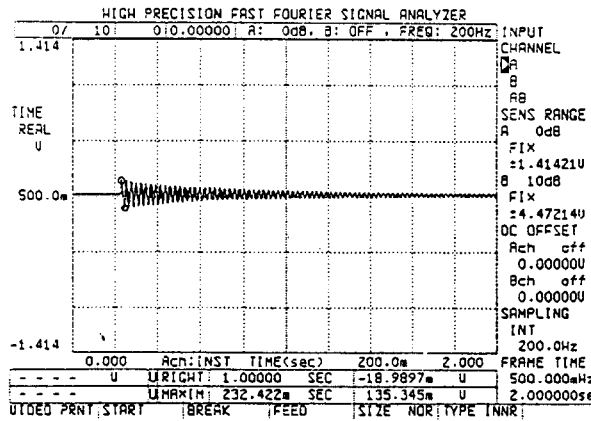


Fig.6 (b) Displacement of gripper by impulse

를 사용하여, 그리퍼의 강제응답을 얻은 것으로서, 그림 (a)가 강제응답에 의한 변위스펙트럼이며, 그림 (b)가 강제응답에 의한 변위진동 결과이다.

5.결론

대상물을 안정하게 잡기 위해서, 잡는힘과 끝점 위치를 PID제어를 적용하여 실험을 하였다. 얻어진 결과를 요약 하면 다음과 같다

1. 압전소자를 액튜에이터로 사용하고, 그리퍼 유연 핑거

의 끝점을 스프링으로 구성하여, 운동방정식을 유도한 후 모드 급수 전개법을 적용하였으며, 시스템을 샘플링주기로 이산화하는 방법을 사용하였다. 얻어진 실험 결과가 양호하여, 이 해석법으로 사용한 그리퍼 모델화가 타당성이 있음을 확인 할수 있었다.

2. 실험결과 잡는힘의 최대 변동량은 15% 정도이며, 잡는힘이 목표 위치에 도달하기 까지 0.5sec가 경과 되었으며, 그 이후에는 매우 안정하게 잡게됨을 알 수 있다. 또한, 선단 변위도 0.5sec후에는 0.5mm로 매우 안정하게 유지됨을 알수 있었다.
3. 레이저 센서로 부터의 변위 신호를 FFT 분석기를 사용하여, 그리퍼의 강제응답을 얻은 것으로서, 그림(a)가 강제응답에 의한 변위진동이며, 그림(b)가 강제응답에 의한 변위 스펙트럼 결과이다.

후 기

“이 논문은 1997년도 전북대학교의 지원 연구비에 의하여 연구 되었음”

참 고 문 헌

1. Tsuneo Yoshikawa, Kiyoshi Nagai, "Manipulating and Grasping Forces in Manipulation by Multifingered Robot Hands", IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.7, No.1, Feb. 1991.
2. Z.W.Ziang, S.Chonan J.Tan: "Tracking Control of a Miniture Flexible Arm Using Piezoelectric Bimorph Cells", The International Journal of Robotics Reserch, Vol.11, No.3, June 1992, Mit Technology.
3. S.M.Yang and Y.J.Lee, "Modal Analysis of Stepped Beams with Piezoelectric Materials", Journal of Soundand Vibration (1994) 176(3), p289-300.
4. Baz A. and Poh S., "Performance of an Active Control System with Piezoelectric Actuators", Journal of Sound and Vibration, 1988, vol.126, no.2, pp.327-343.
5. Liu, Y.C., and Yang, S.M., 1993, "Three Simple and Efficient Methods for Vibration Ccontrol Slewing Flexible Structures", Journal of Dynamic System, Measurement and Control, Vol.115, No.4.
6. H.R.Pota and T.E.Alberts 1995, "Multivariable Transfer Functions for a Slewing Piezoelectric Laminatied Beam ", Journal of Dynamic System, Measurement and Control, Vol.117, p.352-359.
7. Bahran Shahian, michael hassul, 1993, "Control System Digsign Using MATLAB" Prentice Hall.
8. 이재정, 유춘성, 홍동표, 정태진 1996, "분포센서를 가진 인공지능의 PID-힘제어" 한국정밀공학회, 제13권, 제 9호.