

# 壓電素子로 驅動되는 柔軟性 로봇 핑거의 制御

## The Control of a Flexible Robotic Finger Driven by PZT

류 제 춘

안양과학대학 전자계산과

Jaechun, RYU

Dept. of Computer Science

Anyang T. College

박 종 국

경희대학교 공과대학 전자공학과

Chong Kug, Park

Dept. of Electronic Eng.

KyungHee University

### ABSTRACT

In this thesis discuss with a flexible robotic finger design and controller which is used for the micro flexible robotic finger.

So, miniaturization, precision, controller for the control of grasping force and actuator were needed. And, even if we develop a new actuator and controller, in order to use on real system, we must considerate of a many side problem.

In a force control of micro flexible finger for grasping an object, the fingertip's vibration was more important task of accuracy control. And, controller were adopt the PD/PI mixed type fuzzy controller. The controller were consist of two part, one is a PD type fuzzy controller for increase the rising time response, the other is a PI type fuzzy controller for decrease of steady-state error. Especially, in a PD type fuzzy controller, we used only seven rules. And, for a PI controller, we adopt a reset factor for the control of input values. So, we have overcome the exceed of controller's input range. For the estimate of controller's utility and usefulness, we have experiment and computer simulation of three cases. First, we consider of unit force grasping control for a task object, which is 0.03N. Second, bounding grasping force control, which is add to a sinusoidal force on the unit force. At this cases the task force is  $(0.03+0.01 \sin \omega t)$  N. And consider of following of rectangular forces.

### I. 서 론

압전소자는 구동장치를 고속, 고정밀 그리고 소형화가 가능하다. 동적인 동작모드의 해석시 작고 柔軟한 대상물을 잡기 위해서는 잡는 힘의 미세한 제어가 요구되므로 고감도의 힘센서가 필요하다. 본 연구에서는 압전소자를 구동기구로 사용하여 비선형성을 포함하는 柔軟性 핑거를 효과적으로 제어하고,

외란 및 잡는 물체의 질량이 변하거나, 외부의 충격 등으로 인한 진동에 대하여 정밀하게 제어하기 위한 제어를 상황이 변하더라도 변형된 상황을 다시 수학적으로 모델링 하지 않고 제어를 수행 할 수 있는 퍼지이론을 도입하여 퍼지제어를 구성하였다.

## II. 柔軟性 로봇 핑거의 모델링

그림2.1은 본 논문에서 사용한 핑거의 모델이다. 핑거 한쪽면의 손가락을 소형 플렉시블암으로 생각하여 핑거 근원에 구동기로 압전소자를, 핑거 선단에는 접촉력 센서를 부착하였다. 접촉력 센서를 스프링상수  $K_s$ 의 스프링으로 모델화 하였다. 핑거의 접촉면은 충분한 강성을 갖으므로 그림 1과 같이 강체로 모델화 하였다. 암 선단의 힘  $F_s$  를 일정하도록 압전소자의 발생하는 왜곡 모멘트  $M_p$ 를 제어하는 문제를 생각한다. 암이  $x - y$  평면 내에서만 진동하고 센서가 대상물과 서로 접촉하고 있다고 가정하면 운동 방정식은

$$[\rho(x)A(x) + m\delta(x-l)]\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2}[E(x)I(x)(1 + \gamma\frac{\partial}{\partial t})\frac{\partial^2 y}{\partial x^2}] = M_p[\delta'(x-0) - \delta'(x-a)] - F_s, \quad (2.1)$$

가 된다. 여기서  $\rho(x)$ ,  $A(x)$ ,  $E(x)$ ,  $I(x)$ 는 각각 소자 암의 밀도, 단면적, 종탄성계수, 단면 이차모멘트다. 또  $m$ 은 센서의 질량,  $\gamma$ 는 내부 감쇄계수  $\delta(\cdot)$ 는 Dirac의 델타함수  $\delta'(\cdot) = d\delta/dx$ 이다. 또  $F_s$ 는 대상물이 암에 가하는 힘 즉, 센서의 출력이다. 대상물이 정지하고 있는 경우를 고찰하면 센서출력  $F_s$ 는

$$F_s = K_s y(l, t) = K_s y(x, t)\delta(x-l) \quad (2.2)$$

로 표시된다. 여기서  $y(l, t)$ 는 암 선단의 변위이다. 암 근원에는 압전소자가 부착되어 있기 때문에 암 단면은 불연속이다. 암을 2개의 균일한 판으로 나눈다면 고정단으로 부터  $i=1,2$ 로 되고 운동방정식의 해를

$$y(x, t) = \sum_{n=1}^N W_n^i(x) f_n(t) \quad (2.3)$$

로 한다. 여기서  $W_n^i(x)$ 는 압전소자를 갖는 유연성 암의 모드 함수이며 다음과 같이 주어진다.

$$W_n^i(x) = A_n^i S(\xi_n^i x) + B_n^i T(\xi_n^i x) + C_n^i U(\xi_n^i x) + D_n^i V(\xi_n^i x) + \frac{\beta_n^i}{(\xi_n^i)^3} W_n^i(l) V[\xi_n^i(x-l)] H(x-l) \quad i=I, II \quad (2.4)$$

여기서

$$\begin{aligned} S(\xi x) &= \frac{1}{2} [\cosh(\xi x) + \cos(\xi x)], \quad T(\xi x) = \frac{1}{2} [\sinh(\xi x) + \sin(\xi x)], \\ U(\xi x) &= \frac{1}{2} [\cosh(\xi x) - \cos(\xi x)], \quad V(\xi x) = \frac{1}{2} [\sinh(\xi x) - \sin(\xi x)], \end{aligned} \quad (2.5)$$

$$(\xi_n^i)^4 = -\frac{(\rho A)^i p_n^2}{(EI)^i (1 + \gamma p_n)} \beta_n^i = \frac{m p_n^2 + K_s}{E_s J_s (1 + \gamma p_n)}$$

이다.

$H(x-l)$ 은 스텝함수  $p_n$ 은 고유진동수이다. 고유치 및 미정계수  $A_n^i - D_n^i$ 는 핑거의 환경 조건 및 요소간 변위, 경도, 모멘트 및 선단힘이 연속인 것에 의하여 결정된다. 식 2.3을 2.1에 대입하여 매트릭스로 표현하면 운동방정식은

$$M\ddot{F}(t) + \Gamma F(t) + KF(t) = UM_p(t) \quad (2.6)$$

가 된다. 여기서  $F=[f_1(t)\dots f_N(t)]$ 이고  $M, \Gamma, K$  및  $U$ 의 메트릭스 요소는 각각

$$m_{ij} = \int_0^l [\rho(x)A(x) + m\delta(x-l)]W_j(x)W_i(x)dx \quad \gamma_{ij} = \int_0^l \gamma E(x)I(x) \frac{\partial^4 W_j(x)}{\partial x^4} W_i(x)dx$$

$$k_{ij} = \int_0^l [E(x)I(x) \frac{\partial^4 W_j(x)}{\partial x^4} + K_s W_j(x)\delta(x-l)]W_i(x)dx \quad u_i = \int_0^l [\delta'(x) - \delta'(x-l)]w_i(x)dx$$

$$i, j = 1, 2, 3, \dots, \quad (2.7)$$

로 주어진다. 식 2.6을 연속시간계의 상태방정식으로 표시하면

$$\dot{x}(t) = A_c x(t) + B_c M_p(t)$$

$$F_s(t) = C_c x(t) \quad (2.8)$$

단,

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

$$B_c = [OM^{-1}U]^T, \quad C_c = K_s[w_1 \dots w_n, 0 \dots 0]$$

$$(2.9)$$

이다. 상태량  $x(t)$ 를

$$x(t) = [f_1(t) \dot{f}_1(t) \dots f_n(t) \dot{f}_n(t)]^T \quad (2.10)$$

로 변형하여 식 2.8을 다시 표시하면

$$\dot{x}(t) = A_c x(t) + B_c M_p(t)$$

$$F_s(t) = C_c x(t) \quad (2.11)$$

가 된다. 여기서  $A_c, B_c, C_c$ 는  $A', B', C'$  요소를 변형한 것이다. 식 11을 샘플링주기  $T$ 로 이산화하면 상태 방정식 및 출력방정식은

$$x(i+1) = Ax(i) + BM_p(i)$$

$$F_s(i) = Cx(i) \quad (2.12)$$

가 된다. 여기서

$$A = \exp(A_c T), \quad B = \int_0^T \exp[A_c r] dr B_c, \quad C = C_c \quad (2.13)$$

이다. 압 선단의 힘이 일정치로 되면 압전소자의 발생하는 왜곡 모멘트를 제어한다.

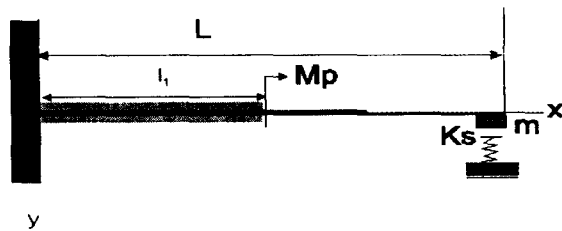


그림 2.1. 柔軟性 핑거의 모델(Model of flexible finger)

### III. 퍼지 제어기 설계

#### 3.1 柔軟性 로봇핑거를 위한 PD형 제어기 설계

모의실험을 위한 PD형 퍼지제어기의 구조를 그림 3.1에 나타내었다. 제어기에 입력되는 각 이득은 정의되어있지 않으므로 임의의 값을 사용한다. 제어기의 이득값이 입력되고 주어진 목적궤적이 주어지면 제어기가 동작하여 식(4.2.12)에 의하여 플랜트에 가해질 모멘트가 계산되고 플랜트에는 이 모멘트 값이 입력되어 센서에 의해  $F_s$ 가 측정된다. 이때 정확한 힘제어를 하여 핑거에 가해질 제어입력 모멘트  $M_p$ 를 구하기 위하여 제안한 PD퍼지방식을 사용하며 퍼지 룰과 룩업 테이블을 이용하여 구한다.

즉, 센서에 의해 측정되는 측정힘을 목적궤적과 비교하여  $e(F_D(t) - F_S(t))$ 와  $ce(\dot{F}_D(t) - \dot{F}_S(t))$ 를 구하고 이를 이용하여  $M_p$ 를 제어규칙 베이스와 最大-最小추론법, 무게重心法으로 계산한 룩업 테이블을 이용하여 계산한다.

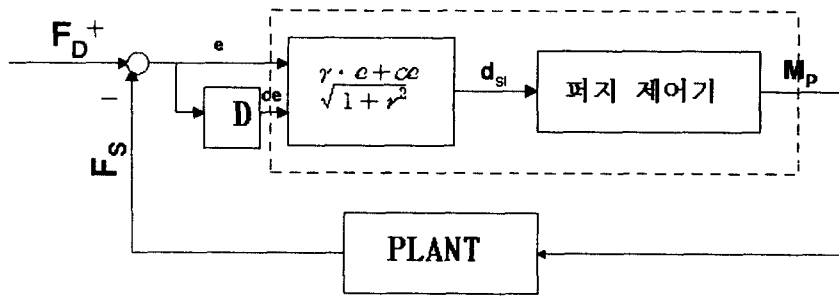


그림 3.1 제안된 PD형 제어기(Proposed PD type controlle)

표 3.1 PD형 제어기를 위한 룩업 테이블

Table 3.1 Look-up table for PD type fuzzy controller

입력라벨	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
출력값	-4.69	-4.26	-3.73	-3.25	-2.26	-2.25	0.06	1.21	1.67	3.24	3.73	4.26	4.69

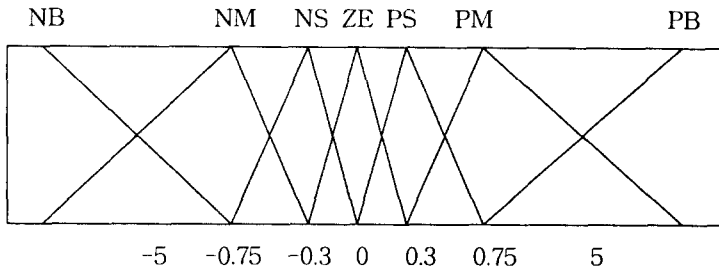


그림 3.2  $d_{st}$ 에 대한 퍼지함수 (Fuzzy membership function for  $d_{st}$ )

### 3.2 PI형 퍼지 제어기의 설계

본 논문에서는 PD방식의 퍼지 제어기에서 발생하는 정상상태의 오차를 감소시키며, 제어입력의 변동분을 구하는 PI형 퍼지 제어기를 사용하였다.

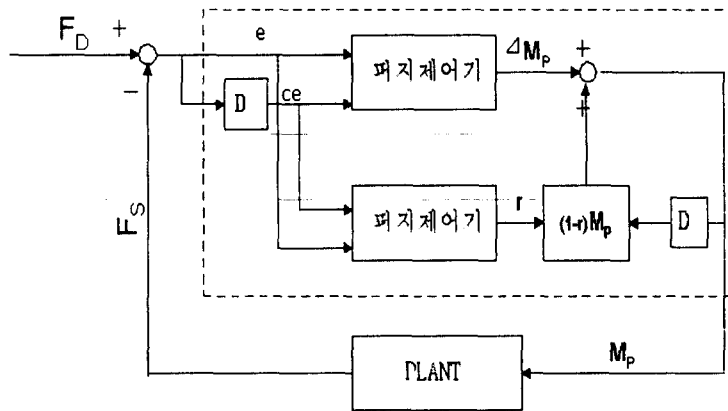


그림 3.3 PI형 퍼지 제어기(PI type fuzzy controller)

제어입력  $M_p$ 의 증가분( $\Delta M_p$ )을 구하기 위하여 출력값( $F_S$ )과 목적값( $F_D$ )과의 차를 계산하여 이를 비선형 양자화에 의하여 멤버쉽 함수값으로 변환한다. 이때 사용하는 오차와 오차의 변화량값에 대한 삼각형 형태의 멤버쉽 함수를 그림 3.4와 3.5에 표시하였다.

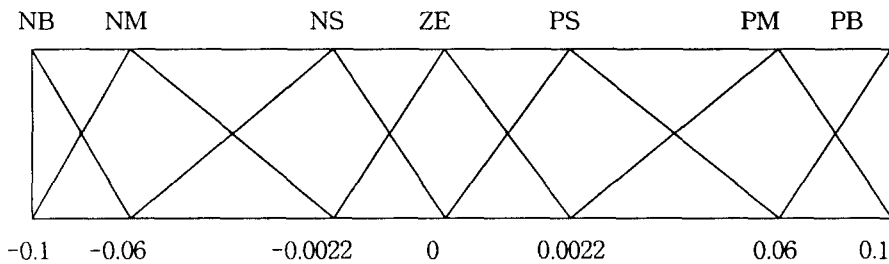


그림 3.4 오차에 대한 퍼지값(Fuzzy membership function for error)

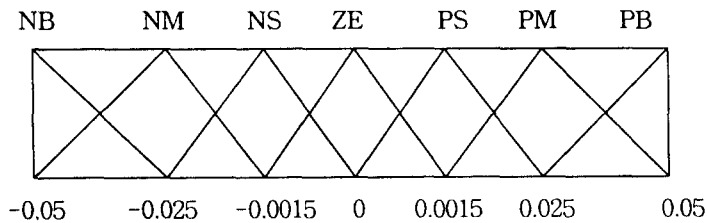


그림 3.5 오차의 변화량에 대한 퍼지값

(Fuzzy membership function for change of error )

### 3.3 PD/PI 혼합형 제어기 설계

본 논문에서 구성하여 사용한 혼합형 제어기는 스위칭규칙을 어떻게 정하느냐가 시스템의 성능에 영향을 미친다. 스위칭 규칙을 기술하면 다음과 같다.

$$IF\ e\ is\ ZERO_e\ and\ ce\ is\ ZERO_{ce}\ then\ a\ is\ 1\ else\ a\ is\ 0 \quad (3.1)$$

본 연구에서는 제어기의 구조를 상태에 따라 적절하게 바꾸어 줌으로써 제어의 효과를 달성하기 위하여 혼합 제어기를 사용하였다. 제안한 제어기는 다음과 같이 동작한다.

제어의 초기에는 적절한 상승시간을 유지하고 오버슈트를 개선할 수 있는 位置型 퍼지제어기로 동작시키고, 오차와 오차의 변화량이 작은 경우는 속도형 퍼지제어기로 작동하도록 하여 정상상태 오차를 효과적으로 줄이도록 하였다. 위의 식 (3.3)에서  $ZERO_e$  와  $ZERO_{ce}$  의 멤버쉽 함수를 그림 3.6과 그림 3.7과 같이 정의하면 퍼지 스위칭 평면은 그림 4.13의 灰色部分으로 표시된다. 그림에서  $ZERO_e$  와  $ZERO_{ce}$  의 멤버쉽 함수의 帶(support)는 位置型 퍼지제어(PD型 제어기)에서 오차와 오차의 변화량으로 구한 새로운 제어변수인  $d_s$  의 ZE 멤버쉽 함수의 帶와 같다.

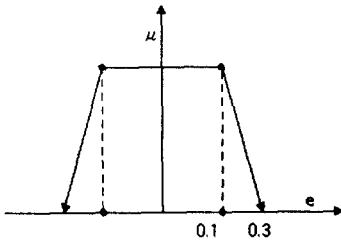


그림 3.6  $ZERO_e$  의 멤버쉽 함수

Fig. 3.6 Membership function of  $ZERO_e$

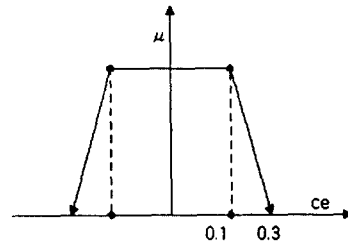


그림 3.7  $ZERO_{ce}$  의 멤버쉽 함수

Fig. 3.7 Membership function of  $ZERO_{ce}$

스위칭 함수는 PD형 시스템은 整定상태 기간에, PI형은 정상편차를 제어하기 위하여 동작한다. 이를 위하여  $d_s$  의 값에 의하여 제어기의 스위칭 함수 a를 아래의 식으로 정의한다.

$$a = \mu_{ZERO_e}(e) \wedge \mu_{ZERO_{ce}}(ce) \quad (3.2)$$

이때 제어입력  $u$  는 다음 식처럼 결정된다

$$u = (1 - a)u_{PD} + au_{PI} \quad (3.3)$$

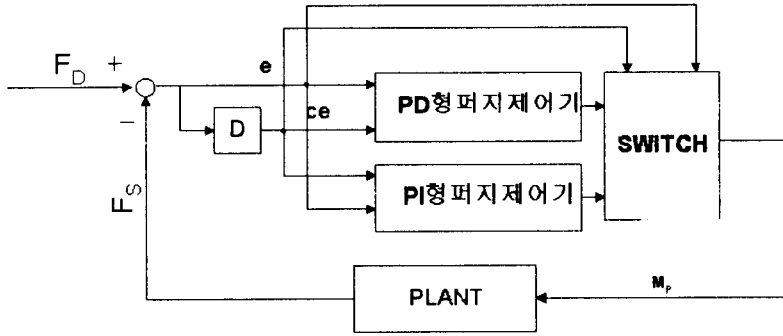


그림 3.9 PD/PI 혼합형 퍼지제어기(PD/PI mixed type fuzzy controller)

#### IV. 실험결과 및 고찰

##### 4.1 실험장치의 구성

본 연구에서 제작하는 핑거는 동판의 양면에 바이몰프형 압전소자(PI 33×10×0.65)를 길게 부착시켜 제작하였다.



그림 4.1 제작된 柔軟性핑거  
(A flexible finger)

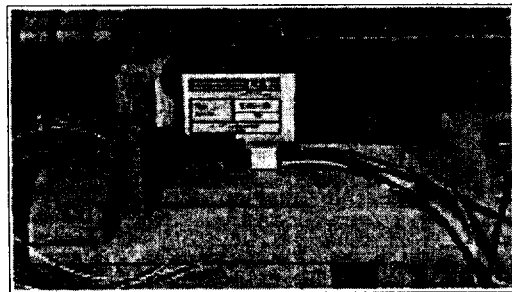


그림 4.2 제작된 핑거와 센서의 실험장치  
(Experiment system)

본 연구에서 사용한 실험시스템 구성도를 그림 4.3에 표시하였다. 실험장치는 압전소자와 동판으로 구성된 기구부, 핑거의 선단에서 힘을 측정하기 위한 센서부, 센서의 정보전달 및 압전소자를 구동하기 위한 파워앰프부, 그리고 제어입력을 발생시키고 측정된 정보를 분석하는 제어부(A/D변환기, 마이크로 프로세서, D/A변환기)로 구성하였다. 핑거 선단의 힘은 선단에 부착한 센서로 측정된다.

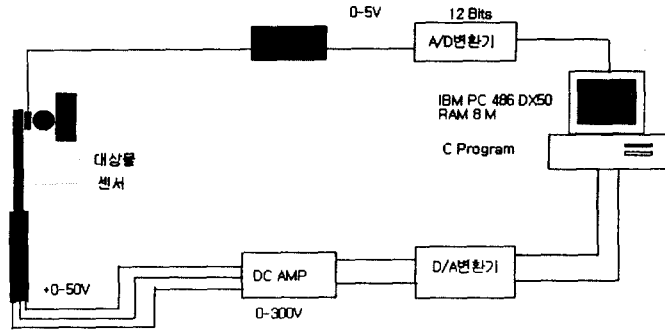


그림 4.3 실험 시스템의 구성  
(Configuration of experiment system)

#### 4.2 고정힘유지의 결과

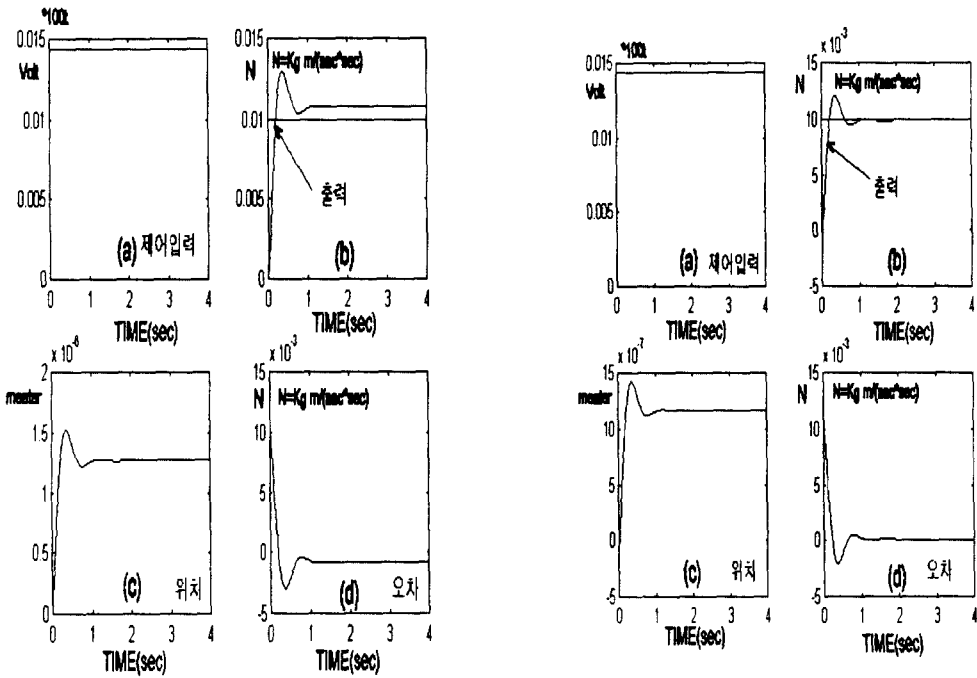


그림 4.4 고정힘(0.01N)의 퍼지제어  
(a) 제어입력 ( $M_P$ ) (b) 목적과 출력 (c) 위치 (d) 오차



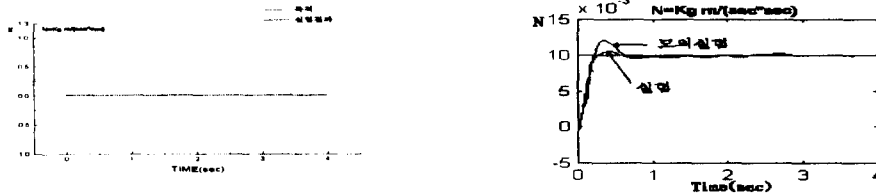


그림 4.5 고정힘(0.01N)을 유지하기 위한 퍼지제어 실험결과

### 4.3 변동하는 힘에 추종하는 문제

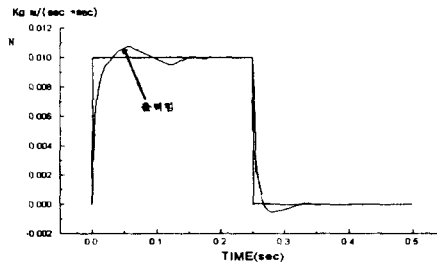


그림 4.6 矩形波 힘에 추종하는 문제의 실험결과

(The experimental result of fuzzy controller for a rectangle forces)

## V. 結 論

본 논문에서는 바이몰프형 압전소자를 구동장치로 사용한 소형 柔軟性 핑거의 제작과 제어기 설계에 대하여 연구하였다. 제작한 핑거와 제어기의 성능을 평가하기 위하여 핑거의 끝점에서 발생하는 힘을 미세하게 제어하였다. 즉, 핑거의 끝점에 0.01N의 미소힘을 발생시키고 일정하게 힘을 유지하는 문제와 끝점에 0.03N의 미소힘을 발생시킨 후에 진폭 0.01N의 2Hz 정현파형의 힘을 첨가한 힘에 추종하는 경우와 구형파힘에 추종하는 문제를 예로 하여 실험과 모의실험을 통하여 제어기의 제어성능을 평가하였다. 앞으로의 연구과제는 2개의 핑거 제작과 응용을 연구의 과제로 남긴다.

## 參 考 文 獻

- [1] B. K. Kim "Simultaneous Control of Position and Contact Force Control of Industrial Manipulators" J. of KIEE Vol.4, no.1, pp.17 - 27, 1991.
- [2] Y. P. Yang, J. S. Gibson "Adaptive Control of a Manipulator with Flexible link" J. of Robotic Systems vol.6, no.3, pp.217 - 2232, 1982.
- [3] W. T. Miler "Historical Perspective & the Art in Robot Force Control" Int. J. Robotic Research, Vol.6, No.1, pp.3-14, 1987.
- [4] J. K. Salisbury and J. J. Craig, "Force Control and Kinematic Issues", The Int. J. of Robotics Research, Vol.1, no.1, pp.4-17, 1993.
- [5] H. Seraji, "Adaptive Force and Position Control of Manipulators", J. of Robotics Systems,