

# 퍼지제어를 이용한 마이크로 로봇트 핑거의 힘제어

## Force Control of Micro Robotic Finger Using Fuzzy Controller

류재춘\* · 박종국\*\*

Jaechun Ryu and Chong kug Park

\*안양전문대학 전자계산과,

\*\*경희대학교 전자공학과

### 요 약

### ABSTRACT

In this paper, a theoretical study is presented for the force control of a miniature robotic manipulator which is driven by a pair of piezo-electric bimorph cells. In the theoretical analysis, one finger is modeled as a flexible cantilevers with a force sensor at the tip and the finger is a solid beam. The robotic finger is used to hold the objects with different stiffness such as an iron block and a living insect and a moving object. So, it is very important to develop an adequate controller for the holding operation of the finger. The main problems in force controlling are overdamping, overshoot and unknown environment(such as the stiffness of object and unknown plant parameters). So, the main target is propose the new fuzzy compensation for unknown environment and increase the system performance. The fuzzy compensation is implemented by using PI-type fuzzy approach to identified unknown environment. And the result of proposed controller was compared with the conventional PID and optimal controller.

### 1. 서 론

기계의 자동화 시스템 도입과 로봇트의 사용이 증가함에 따라 로봇트에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며 최근에는 로봇트 핸드의 고기능화, 고정밀화 그리고 소형화가 요구되고 있다. 앞으로는 로봇트가 각종 산업 및 생활 환경에 사용되면서 그에 따라 다양각색의 물건을 잡는 기회가 증가하리라 생각된다. 그 일례로 유연하고 파괴되기 쉬운 소물체를 잡는 기구가 있다면 이러한 기구를 실현하기 위해서는 마이크로 구동기 및 각종 형태의 압력 센서의 개발 및 선단 힘의 미세한 제어가 필요하다. 기존의 로봇트 핑거에 관한 연구에서는 구동기로 서보 모터가 널리 사용되어 동력을 와이어나 기어 등으로 관절에 전달하는 방법이 연구되고 있으나 이와 같은 구동기는 마찰 및 백래쉬 등에 의해 빠르고 보다 정확한 위치 및 미소 힘 제어는 곤란하고 더욱이 기구의 소형화에는 한계가 있다[1-4]. 따라서 이쿠타 등은 형상기억합금을 구동기로 한 기구를 개발하였으나 형상기억합금은 응답 속도가 지연되는 문제점이 있다[5]. 이에 반하여 조난 등은 압전소자를 이용한 기구를 개발하였는데

이는 빠르고 정확한 제어 및 소형화가 가능하였다[6]. 대상물을 잡기 위해서는 잡는 힘을 정확하게 제어할 필요가 있다. 따라서 힘 제어형 로봇트 핸드의 연구의 과정에서 각각의 제어 방법이 채용되고 있으나[7-11] 대상물의 변화 및 환경의 변화에 능동적으로 대처할 수 있는 방법은 발표되지 않고 있다. 따라서 본 논문에서는 이러한 환경의 변화에 능동적으로 대처하기 위한 퍼지제어기를 구성하여 환경의 변화에 능동적인 제어기를 설계하였다. 제어기의 효용성 및 실용성 등을 고려하기 위하여 본 논문에서는 선단에 힘 센서를 갖는 바이몰형 압전소자를 구동기로 하는 소형 핑거의 미소힘 제어를 위해 선단에 0.03 N의 미소 힘을 발생시킨 후에 이 힘을 유지하는 경우와 0.01 N의 정현파형의 힘에 추종되는 문제 그리고 잡는 물체의 대상이 변하는 상황에 대하여 모의실험을 하고 대상물의 변화에 따라 잡는 힘의 크기를 변화하여 가면서 제어기에 대한 모의실험을 하였다. 핑거 선단의 힘 센서는 질량/스프링 모델로 모델 화하여 모드 급수 전개법을 사용하여 운동방정식을 도출하였고 스프링 상수의 값이 대상물의 견고성에 따라 달라지는 점을 고려하여 상수의 값을 인위적으로 변화시켜 제어를

수행하였다.

## 2. 제어대상의 모델링

그림 1은 본 논문에서 사용한 핑거의 모델이다. 핑거 한쪽 면의 손가락을 소형 플렉시블 핑거로 생각하여 핑거 근원에 구동기로 압전소자를, 핑거 선단에는 접촉력 센서를 부착하였다. 접촉력 센서를 스프링 상수  $K_s$ 인 스프링으로 모델링 하였다. 핑거의 접촉면은 충분한 강성을 가지므로 그림 1과 같이 강체로 모델화 하였다.

이제 핑거 선단의 힘  $F_s$ 를 일정하게 하면 압전소자의 발생하는 왜곡 모멘트  $M_p$ 를 제어하는 문제를 생각한다. 핑거가  $x-y$  평면 내에서만 진동하고 센서가 대상물과 서로 접촉하고 있다고 가정하면 운동 방정식은

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

가 된다. 여기서  $\rho(x)$ ,  $A(x)$ ,  $E(x)$ ,  $I(x)$ 는 각각 소자 핑거 계의 밀도, 단면적, 종탄성계수, 단면 이차 모멘트다. 또  $m$ 은 센서의 질량,  $\gamma$ 는 내부 감쇄계수,  $\delta(\cdot)$ 는 Dirac의 델타 함수  $\delta(\cdot) = d\delta/dx$ 이다. 또  $F_s$ 는 대상물이 핑거에 가하는 힘 즉, 센서의 출력이다. 대상물이 정지하고 있는 경우를 고찰하면 센서 출력  $F_s$ 는

$$F_s = K_s y(l, t) = K_s y(x, t) \delta(x-l) \quad (2)$$

와 같이 표시된다. 여기서  $y(l, t)$ 는 핑거 선단의 변위이다. 핑거 근원에는 압전소자가 부착되어 있기 때문에 핑거 단면은 불연속이다. 거기에 핑거를 2개의 균일한 판으로 나눈다고 생각하면 고정만 측으로부터  $i=1, 2$ 로 되고 운동방정식의 해를

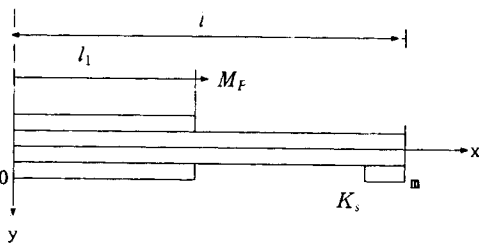


그림 1. 핑거의 모델  
Fig. 1. Model of Finger

$$y(x, t) = \sum_{n=1}^N W_n^i(x) f_n(t) \quad (3)$$

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

$$W_n^i(x) = A_n^i S(\zeta_n^i x) + B_n^i T(\zeta_n^i x) + C_n^i U(\zeta_n^i x) + D_n^i V(\zeta_n^i x) + \frac{\beta_n^4}{(\zeta_n^i)^3} W_n^i(l) V[\zeta_n^i(x-l)] H(x-l) \quad i=I, II \quad (4)$$

여기서

$$\begin{aligned} S(\zeta x) &= \frac{1}{2} [\cosh(\zeta x) + \cos(\zeta x)], \\ T(\zeta x) &= \frac{1}{2} [\sinh(\zeta x) + \sin(\zeta x)], \\ U(\zeta x) &= \frac{1}{2} [\cosh(\zeta x) - \cos(\zeta x)], \\ V(\zeta x) &= \frac{1}{2} [\sinh(\zeta x) - \sin(\zeta x)], \\ (\zeta_n^i)^4 &= -\frac{(\rho A)'}{EI} \frac{p_n^2}{(i + \gamma p_n)}, \\ \beta_n^4 &= \frac{m p_n^2 + K_s}{E_b I_b (1 + \gamma p_n)} \end{aligned} \quad (5)$$

이다. 위의 식에서  $H(x-l)$ 은 스텝 함수  $p_n$ 은 복소 고유 진동수이다. 고유치 및 미정계수  $A_n^i - D_n^i$ 는 핑거의 환경 조건 및 요소간 변위, 경도, 모멘트 및 선단 힘이 연속인 것에 의하여 결정된다. 식(3)을 식(1)에 대입하여 칼레루킨법을 적용하여 매트릭스로 표현하면 운동방정식은

$$M\ddot{F}(t) + \Gamma\dot{F}(t) + KF(t) = UM_p(t) \quad (6)$$

가 된다. 여기서  $F(t) = [f_1(t), f_2(t), \dots, f_N(t)]^T$ 이고  $M$ ,  $\Gamma$ ,  $K$  및  $U$ 의 매트릭스 요소는 각각

$$\begin{aligned} m_{ij} &= \int_0^l [\rho(x)A(x) + m\delta(x-l)] W_j(x) W_i(x) dx \\ \gamma_{ij} &= \int_0^l \gamma E(x)I(x) \frac{\partial^4 W_j(x)}{\partial x^4} W_i(x) dx \\ k_{ij} &= \int_0^l [E(x)I(x) \frac{\partial^4 W_j(x)}{\partial x^4} + K_s W_j(x) \delta(x-l)] W_i(x) dx \\ u_{ij} &= \int_0^l [\delta'(x) - \delta'(x-l_1)] w_i(x) dx \end{aligned} \quad (7)$$

$i, j = 1, 2, 3, \dots, N$

로 주어진다. 식(6)을 연속시간계의 상태 방정식으로 표시하면

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A'_c x(t) + B'_c M_p(t) \\ F_s(t) &= C'_c x(t) \end{aligned} \quad (8)$$

단,

$$\begin{aligned} x(t) &= \begin{bmatrix} F(t) \\ F'(t) \end{bmatrix}, A'_c = - \begin{bmatrix} O & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}\Gamma \end{bmatrix} \\ B'_c &= [OM^{-1}U]^T, C'_c = K_s[w_1 \dots w_n, 0 \dots 0] \end{aligned} \quad (9)$$

이다. 상태량  $x(t)$ 를

$$x(t) = [f_1(t) \dot{f}_1(t) \dots f_n(t) \dot{f}_n(t)]^T \quad (10)$$

로 변형하여 식(8)을 다시 표시하면

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A_c x(t) + B_c M_p(t) \\ F_s(t) &= C_c x(t) \end{aligned} \quad (11)$$

가 된다. 여기서  $A_c, B_c, C_c$ 는  $A'_c, B'_c, C'_c$ 요소를 변형한 것이다. 식(11)을 샘플링 주기  $T$ 로 이산화 하면 상태 방정식 및 출력 방정식은

$$\begin{aligned} x(i+1) &= Ax(i) + BM_p(i) \\ F_s(i) &= C_x(i) \end{aligned} \quad (12)$$

가 된다. 여기서

$$A = \exp(A_c T), B = \int_0^T \exp[A_c r] dr B_c, C = C_c \quad (13)$$

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

### 3. 제어기 설계

이제 핑거의 선단 힘을 일정하게 하기 위해 압전소자에서 발생하는 왜곡모멘트를 제어하는 문제를 적분 동작을 포함하는 최적 제어 기법과 PID제어에 의한 방법 그리고 퍼지제어 기법에 의하여 제어기를 설계하고 각 제안된 제어기의 성능을 비교한다.

#### 3.1 PID 제어에 의한 제어기

이제 핑거를 제어하기 위한 PID 제어기를 다음과 같이 구성한다. 제어 신호로는 핑거의 선단에서 측정된 힘과 이 힘의 시간 미분을 폐환신호로 사용하여 소자에 인가하는 전압을 제어한다. 이 경우 제어기의 블록 선도를 그림 2에 표시하였다. 이때 압전 구동기가 핑거에 가하는 왜곡 모멘트는

$$M_p(t) = G_p[F_d - F_s(l, t)] + G_i \int_0^t [F_d - F_s(l, z)] dz + G_d \dot{F}_s(l, t) \quad (14)$$

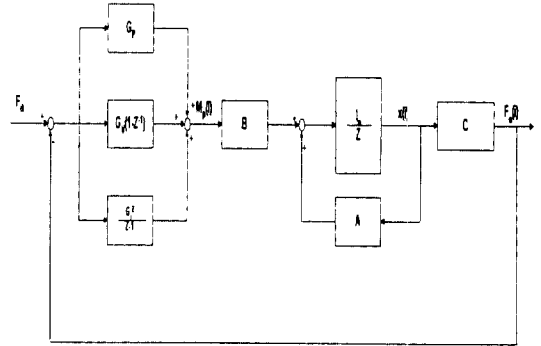


그림 2. PID 제어기의 블록 선도  
Fig. 2. Block Diagram of PID Controller

로 표시된다. 여기서  $F_s(l, t), F_d(l, t)$ 는 핑거의 선단 힘과 힘의 시간 미분, 또  $G_c, G_p, G_i$ 는 비례, 미분, 적분 이득이다. 식 (14)을 샘플링 주기  $T$ 로 이산화 하면 제어 모멘트  $M_p(i)$ 는

$$\begin{aligned} M_p(i) &= G_p[F_d - F_s(i)] + G_v[F_s(i) - F_s(i-1)] \\ &+ \frac{1}{2}G_i \sum_{k=0}^i [2F_d - F_s(k) - F_s(k-1)] \end{aligned} \quad (15)$$

#### 3.2 최적 제어기의 설계

제 2장에서 얻어진 상태 방정식 및 출력방정식 식 (12)에 대해서 제어 입력을

$$M_p(i) = -Hx(i) + Kz(i)$$

$$z(i+1) = z(i) + \frac{1}{2}[2F_d - F_s(i) - F_s(i-1)] \quad (16)$$

로 하고 식(12)의 편차

$$x_c(i) = x(i) - x(\infty), M_e(i) = M_p(i) - M_p(\infty) \quad (17)$$

에 대하여 평가함수

$$J = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{\infty} [x_c(i)^T Q x_c(i) + M_e(i+1) R M_e(i+1)] \quad (18)$$

가 최소가 되도록 하는 제어 입력을 결정한다. 여기서  $Q, R$ 은 하중 행렬이다.

이때 최적인  $H$ 와  $K$ 는

$$(H, K) = (F^0 A, F^0 B + I) E^{-1} \quad (19)$$

가 되고, 여기서

$$E = \begin{bmatrix} A - I_n & B \\ C & 0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$F^0 = (R + B^T P B)^{-1} B^T P A \quad (21)$$

이며  $P$ 는 리카치방정식

$$P = Q + A^T P A - A^T P B (R + B^T P B)^{-1} B^T P A \quad (22)$$

의 정정유일해이다. 식(21)을 풀기 위해 비정상 리카치방정식

$$P(i+1) = Q + A^T P(i) A - A^T P(i) B (R + B^T P(i) B)^{-1} B^T P(i) A \quad (23)$$

을 사용하여  $P(0)=0$ 으로 놓고 반복 계산을 하여 정상해  $P$ 를 구한다. 상태궤환 제어 규칙 식(16)을 실현하기 위해서는 전체적인 상태 변수를 알아야 할 필요가 있다. 그러나 현실적으로 전체의 상태 량을 센서로 검출하는 것은 불가능하다. 따라서 검출할 수 없는 상태 량을 구하기 위하여 상태 관측기를 사용한다. 본 절에서는 최소 차원 관측기를 사용하였다. 실험에서는 연산 시간을 감소시키고, 샘플링 주기를 짧게하기 위해 힘의 시간 미분  $\dot{F}_s$ 를

$$\dot{F}_s(i) = [F_s(i) - F_s(i-1)]/T \quad (24)$$

로 하여 관측기의 차원을 하나 감소 시켰다. 이제 행렬

$$S = \begin{bmatrix} C \\ W \end{bmatrix}; W((n-l) \times n) \quad (25)$$

가 역행렬을 갖는다면  $W$ 를 적당하게 선택하여 아래와 같이 변환한다.

$$SAS^{-1} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}, SB = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} \quad (26)$$

다음에 적당한 설계 파라메타  $L$ 을 사용하여  $\hat{A}$ 를

$$\hat{A} = A_{22} - LA_{12} \quad (27)$$

로 놓으면, 최적 최소 차원 관측기는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \hat{x}(i) &= \hat{D} \omega(i) + \hat{H} F_s(i) \\ \omega(i+1) &= \hat{A} \omega(i) + \hat{K} F_s(i) + \hat{B} M_p(i) \end{aligned} \quad (28)$$

여기서

$$\hat{K} = \hat{A} L + A_{21} - LA_{11}$$

$$\hat{B} = B_2 - LB_1$$

$$D = S^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ I_{n-l} \end{bmatrix}$$

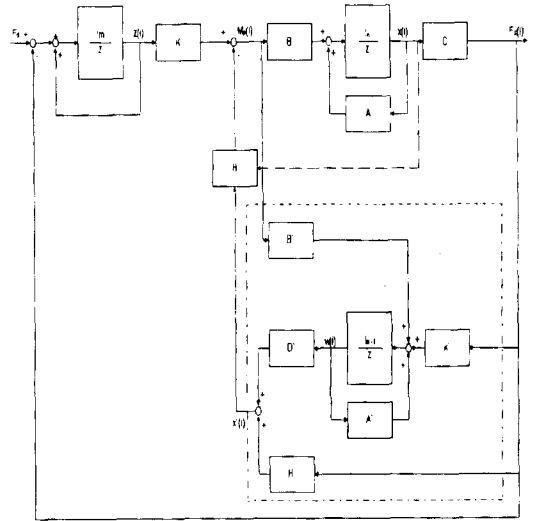


그림 3. 최적 제어 블록 선도  
Fig. 3. Block Diagram of Optimal Controller

$$\hat{H} = S^{-1} \begin{bmatrix} I_l \\ L \end{bmatrix} \quad (29)$$

이고

$$L = A_{22} \Lambda A_{12}^T (I_{n-1} + A_{12} \Lambda A_{12}^T)^{-1} \quad (30)$$

이다.  $\Lambda$ 는 리카치방정식

$$\begin{aligned} \Lambda &= I_{n-1} + A_{22} \Lambda A_{22}^T - \\ &A_{22} \Lambda A_{12}^T (I_l + A_{12} \Lambda A_{12}^T)^{-1} A_{12} \Lambda A_{22}^T \end{aligned} \quad (31)$$

의 해이다. 여기서 이제 1차 모드만을 고려한 경우에는 아래의 식을 사용하여 상태량을 얻을 수 있다.

$$\hat{x}(i) = \begin{bmatrix} K_s W_1 & 0 \\ 0 & K_s W_1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} F_s \\ (F_s(i) - F_s(i-1))/T \end{bmatrix} \quad (32)$$

이때 제어 규칙은

$$\begin{aligned} M_p(i) &= -H \hat{x}(i) + K z(i) \\ z(i+1) &= z(i) + \frac{1}{2} [2F_d - F_s(i) - F_s(i-1)] \end{aligned} \quad (33)$$

이 된다.

### 3.3 퍼지제어에 의한 제어기

본 절에서는 오차와 오차의 변동값(미분값)에 의한 퍼지 제어를 설계한다. 제어기 구성의 기본적인 원리는 Look-Up 테이블에 의한 제어기의 설계방식에 따라 오차와 오차의 변동분에 대한 멤버십 함수를 설정하고 이를 이산화 집합으로 한다. 멤버십 함수는 계

산의 편리성과 룩업 테이블 작성의 편리성을 도모하고 앞으로의 확장을 예상하여 삼각형 형태의 멤버쉽 함수를 사용하였다. 최근 퍼지 제어기에 대한 연구가 많이 진전되었고 각종 제어기의 응용에도 많이 발표되고 있다. 발표되고 있는 제어기는 주로 오차와 오차의 미분(변동분:차분)에 의해 새로운 제어 입력을 구하는 방식(PD형)이 주로 연구되고 있다. PD형 퍼지 제어기의 경우 응답시간은 빠르게 할 수 있으나 정상상태 오차를 줄이는 방법이 결여되어 스텝입력에 대한 응답특성에서 어느 정도의 진동을 포함하고 있다. 따라서 이러한 형태의 제어기는 저주파 충격등에 대한 진동제어에는 사용하기가 곤란하다. 또한 센서나 각종 계측기의 측정시에도 측정 기기 자체의 오류도 포함되어 있으며, 구동기 자체도 외부의 외란과 저주파 잡음 및 진동 등으로 인해 정확한 구동값을 얻을 수 없다. 이러한 문제를 해결하고, 보다 효과적으로 제어하기 위하여 퍼지 제어기에 신경망을 접목하는 기법이 연구되고 있다.

그러나 신경망을 이용하면 정상상태의 오차는 줄일 수 있으나, 정확한 제어목표에 도달하기까지 학습하는 시간이 필연적으로 소요되는 새로운 문제점에 봉착하게 된다.

### 3.3.1 PI형 퍼지 제어기의 설계

본 연구에서 기존의 PD 방식의 퍼지 제어기에서 발생하는 정상상태의 오차를 감소시키며, 기존의 제어기에 신경망을 첨가할때 문제가 되는 학습시간을 해결하기 위해 새로운 형태의 퍼지 제어기를 제안한다. 제안한 제어기는 오차와 오차의 미분을 퍼지 제어의 전건부의 입력으로 사용하고, 제어기의 지식베이스인 퍼지를 규칙과 추론의 편리성을 도모하기 위한 룩업테이블을 사용하여 제어 입력의 변동분을 구하는 형태로, 이를 기존의 PD형 제어기에 대응하는 개

념으로 PI형 퍼지 제어기라 하였다. 제안한 새로운 퍼지 제어기인 PI형 퍼지 제어기의 기본 구조를 그림 4에 나타내었다. PI형 제어기는 내부의 적분 동작에 의해 성능의 저하가 발생한다. 따라서 PI 제어기의 과도응답 특성을 개선하는데에는 시스템의 차수가 증가하면 할수록 무척 어려운 일이다. 이것은 일반적으로 PI 제어기를 사용하지 않는 이유이다. 실제적으로 퍼지 제어기는 위상평면하에서 동작한다. 즉 제어기의 출력은 입력의 증가분보다 다음 식과 같이 입력 자체에 의하여 영향을 받는다.

$$u(k+1) = u(k) + \Delta u(k) \quad (34)$$

따라서 증가분을 최대로 선택하면 스텝 응답에서의 도달시간응답은 만족하게 얻을 수 있으나, 오버슈트는 피할 수 없다. 이러한 오버슈트 문제를 극복하려면 가속오차( $\ddot{e}$ )를 적당한 값으로 선택하여야 한다. 그러나 가속오차의 측정은 쉬운 일이 아니므로 가속오차를  $\dot{e}(k)$ 와  $\dot{e}(k-1)$ 로 구한다. 하지만 이 경우, 샘플링 시간과 한스텝 전의 값을 모두 기억해야 한다. 만약, 계산으로 가속오차를 구하고, 이를 퍼지 제어기에 적용할 경우 물의 수가 증가되며, 추론의 시간도 증가하므로 퍼지 제어기의 구성에 계산값을 이용하는 것은 매우 곤란하다. 또한 제어 입력이 너무 커 입력의 한계를 벗어날 수 있으므로, 제어 입력에 리셋항을 추가하여 다음 식과 같이 새로운 제어입력을 구한다.

$$u(k+1) = (1-r(k))u(k) + \Delta u(k) \quad (35)$$

여기서  $k$ 는 샘플링 순서이고  $r(k)$ 는 리셋항으로 0과 1 사이의 값이 되므로 이 값을 퍼지룰을 이용하여 설정할 수 있다.

### 3.3.2 제어기 설계의 구체적인 방법

제어 대상인 플랜트(압전소자핑거)에 입력될 제어

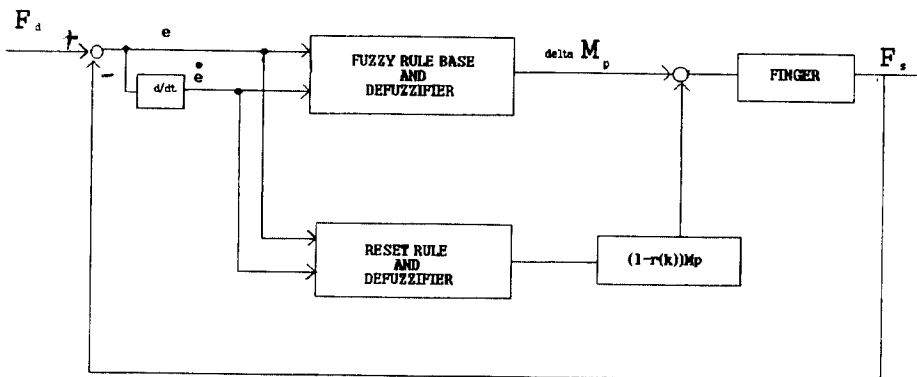


그림 4. PI형 퍼지 제어기  
Fig. 4. PI Type Fuzzy Controller

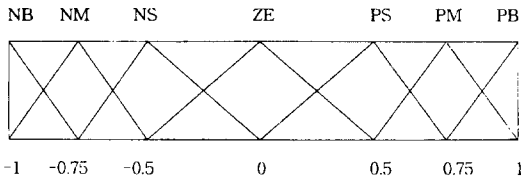


그림 5. 오차에 대한 퍼지값  
Fig. 5. Fuzzy Membership Function for Error

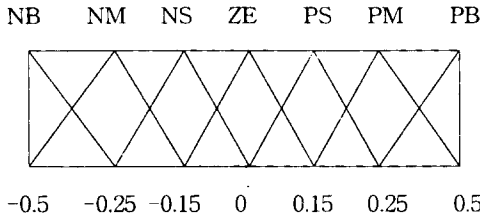


그림 6. 오차의 미분(오차율)에 대한 퍼지값  
Fig. 6. Fuzzy Membership Function for Error Rate

입력 Mp를 다음과 같이 퍼지 방법에 의하여 구한다. 먼저 증가분( $\Delta M_p$ )를 구하기 위하여 제어대상에서 출력되는 출력힘( $F_s$ )과 제어 목적힘( $F_D$ )의 차를 계산하여 이를 비선형 이산화에 의하여 멤버십 함수값으로 변환한다. 이때 사용하는 오차와 오차의 미분값에 대한 삼각형 형태의 멤버십 함수를 그림 5와 6에 표시하였다.

### 3.3.3 추론과 비퍼지화

본 제어기에서 사용되는 추론의 규칙은 MAX-MIN 규칙을 사용한 추론을 사용한다. 이제 오차와 오차율이 결정되면 이 값에 의한 제어규칙을 만든다. 제어규칙은 다음 식과 같이 구성할 수 있다.

$$R_i : IF e \text{ is } A_i \text{ AND } \dot{e} \text{ is } B_i \text{ THEN } \Delta u \text{ is } C_i \quad (36)$$

여기서  $i$ 는 규칙의 수를 말하고  $R$ 은 제어물을  $A_i, B_i, C_i$ 는 각각 오차, 오차의 미분 그리고 제어입력에 대한

표 1.  $\Delta u(\Delta M_p)$ 를 구하기 위한 퍼지룰 테이블  
Table 1. 3.6 Fuzzy Rule Table For  $\Delta U$

$e \backslash \dot{e}$	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	NP
NB	NB	NB	NB	NM	NS	NS	ZE
NM	NB	NM	NM	NM	NS	ZE	PS
NS	NB	NM	NS	NS	ZE	PS	PM
ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZE	PS	PS	PM	PB
PM	NS	ZE	PS	PM	PM	PM	PB
PB	ZE	PS	PS	PM	PB	PB	PB

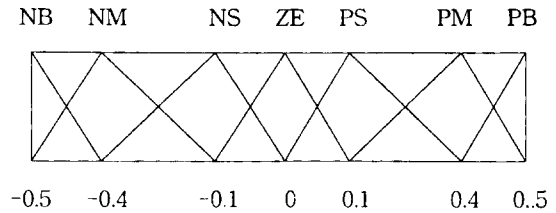


그림 7.  $\Delta u$ 에 대한 퍼지값  
Fig. 7. Fuzzy Membership Function for  $\Delta U$

퍼지값이다. 이러한 규칙을 룰테이블로 표현한 것이 Table 1이다. 이 룰 테이블에 의해 계산될 출력( $\Delta u$ )의 퍼지함수는 그림 7에 나타내었다.

이제 제어물과 입/출력에 대한 멤버십함수값을 이용하여 룰테이블을 작성한다. 룰테이블을 작성하기 위하여서는 비퍼지화 방법으로 다음 식과 같이 무게중심법을 사용하였다.

$$\alpha_i = \mu_{A_i}(e) \wedge \mu_{B_i}(\dot{e}) \quad (37)$$

$$\mu_{C_i}' = \alpha_i \wedge \mu_{C_i} \quad (38)$$

$$\Delta u = \frac{\sum_{i=1}^N \alpha_i \Delta \mu_i}{\sum_{i=1}^N \alpha_i} \quad (39)$$

같은 방법과 절차를 이용하여 제어기의 블록선도와 식(35, 40)에 기술한 RESET 항을 구한다. RESET 항을 구하기 위하여

$$R_j : IF e \text{ is } A_j \text{ AND } \dot{e} \text{ is } B_j \text{ then } r \text{ is } R_j \quad (40)$$

의 식을 이용한다. 여기서  $R_j$ 는 NR(no reset), VR (very small reset), SR(small reset) MR(medium reset), BR(big reset), PR(very big reset), CR(reset)이다. 따라서 제어입력은 다음식처럼 합성한다.

표 2. 3.9 r에 대한 퍼지룰  
Table 2. Fuzzy Rule Table for Reset

$e \backslash \dot{e}$	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	NP
NB	NR	NR	MR	CR	MR	MR	NR
NM	NR	NR	MR	MR	MR	NR	NR
NS	NR	NR	MR	MR	MR	NR	NR
ZE	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
PS	NR	NR	MR	MR	MR	NR	NR
PM	NR	MR	MR	MR	MR	NR	NR
PB	NR	MR	MR	CR	MR	MR	NR

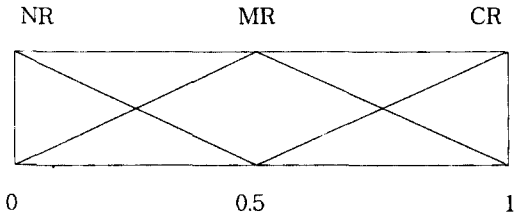


그림 8. Reset에 대한 퍼지값  
Fig. 8. Fuzzy Membership Function for Reset

$$M_p(k+1) = (1-r(k))M_p(k) + \Delta M_p(k) \quad (41)$$

리셋항을 구하기 위한 퍼지 룰 테이블은 Table 2이고 이때 사용되는 RESET의 퍼지 멤버쉽함수는 그림 8에 표시하였다.

#### 4. 모의실험 결과 및 고찰

##### 4.1 정지 대상물을 일정치의 힘으로 잡는 문제

PID 제어와 최적 제어, 그리고 퍼지제어기를 사용한 경우 선단 힘을 일정치  $F_d=0.03$ 으로 유지하는 문제를 고찰한다. 모의실험에서 샘플링 주기를 3ms로 한다. 그림 9는 PID의 제어 결과 결과가 가장 좋은 것을 나타낸 것이고 그림 10은 최적 제어 결과 제어 결과가 가장 좋은 하중 행렬을  $R=0.0001$ ,  $Q=\text{diag}(100 \ 100000 \ 0.001 \ 1)$ 로 선택한 경우의 결과이다. 그

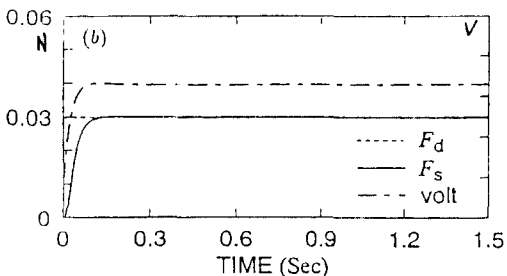
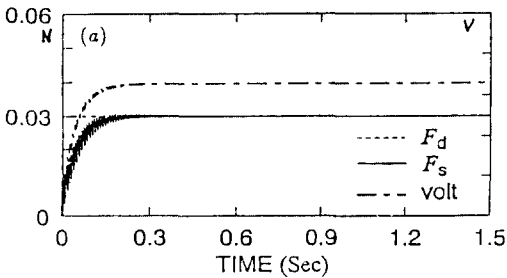


그림 9. 고정힘의 PID 제어 결과  
Fig. 9. Result of PID Controller For Unit Force

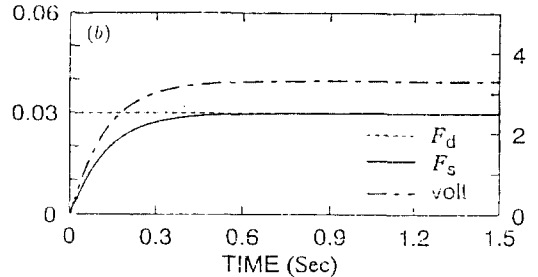
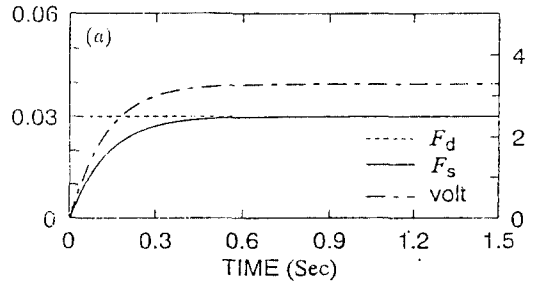


그림 10. 최적제어 결과  
Fig. 10. Result of Optimal Controller

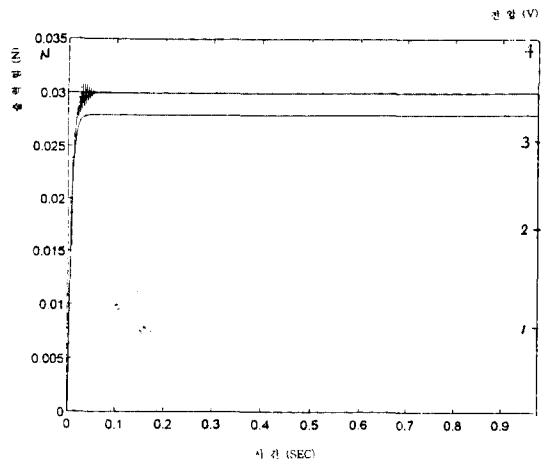


그림 11. 퍼지제어 결과  
Fig. 11. Result of Fuzzy Controller

리고 그림 11은 이 경우의 퍼지 제어기로 제어한 결과이다. 그림 중의 파선은 목표힘  $F_d$ , 실선은 선단 힘  $F_s$ , 일점쇄선은 제어 입력 ( $M_p$ )이다. 실제로 압전소자에 가해지는 제어 입력은  $M_p$  d이므로 이값은 실험적으로 0.03 N의 힘을 출력하기 위하여 약 3.2 V의 출력을 내야한다[20]. 그림 10에서 (a)는 수치계산에서 상태량을 관측기에서 추정한 경우의 결과, (b)는 관측기를 사용하여 상태량을 해석적으로 구한 결과이다. PID 제어를 사용하여 최적 제어와 동일 조건하에서 제어를 행한 경우의 결과인 그림 9(a)는 변환 이득을

$G_p=0.07$ ,  $G_v=0.001$ ,  $G_i=0.05$ 로 한 경우의 결과이고, 그림 9(b)는 수렴이 빨리 되는 계인을  $G_p=0.3$ ,  $G_v=0.001$ ,  $G_i=0.1$ 로 한 결과이다. 모의 실험 결과 미세한 진동이 나타남을 알 수 있으나 대체로 좋은 성능을 나타냄을 알 수 있다. 이와 같이 PID 제어를 사용하여 핑거선단의 미소 힘을 제어하는 것이 가능하고 복잡한 최적 제어를 사용하는 것 보다 PID 제어가 타당하다고 말할 수 있다. 그림 11은 퍼지제어의 제어 결과로 PID 제어와 동일한 제어 성능을 가짐을 알 수 있다. 그러나 그림 11에서 밑부분의 실선은 제어입력  $M_p$ 로 참고문헌 20에 의하여 약 3.2 V 정도의 전압이 출력되어야 하는데 이값은 3.2 V에 미치지 못하므로 실제의 제어시스템에서는 사용할 수 없고 제어물을 다시 설정해야함을 알 수 있다. 세 그림을 비교하면 최적 제어나 퍼지제어를 사용한 경우보다 PID 제어를 사용한 경우가 수렴속도가 빠른 것을 알 수 있다. 따라서 고정힘을 유지하는 문제는 고전적인 PID 제어가 우수한 제어성능을 나타내었다.

**4.2. 정지 대상물에 변동하는 힘을 가하는 문제**

전절에서는 움직이지 않는 대상물에 대하여 일정한 힘을 가하는 문제를 검토하였으나 이와 같이 간단한 문제에서는 모든 제어가 좋은 결과를 나타내고 있다. 본 절에서는 움직임이 없는 대상물에 대하여 지정된 정현파의 힘을 가하고 힘 추종 문제를 취급한다. 구체적으로 접촉력을 초기치 0.03 N, 진폭 0.01 N의 정현파를 설정하여 주파수  $f=2.5$  Hz로 변형하면서 모의실험을 하였다. 그림 12에서 그림 14까지는 목표치의 주파수를  $f=2.5$  Hz로 하여 목표치에의 추종성이 가장 좋게 되는 계인의 조합을 선택한 결과이다. 그림

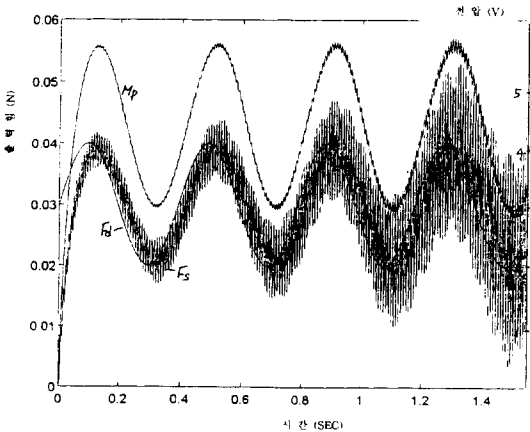


그림 12. 변동힘에 대한 최적제어 결과  
Fig. 12. Result of Optimal Controller For Bounding Force

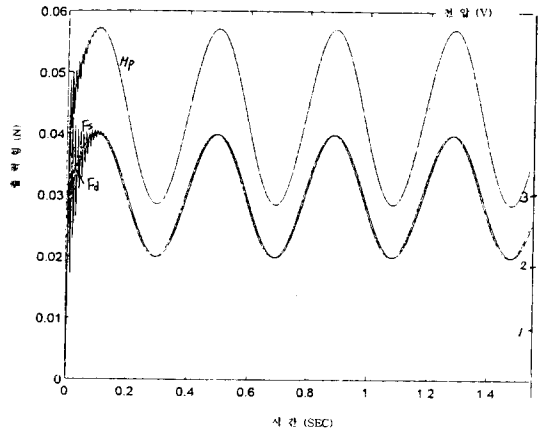


그림 13. PID 제어 결과  
Fig. 13. Result of PID controller

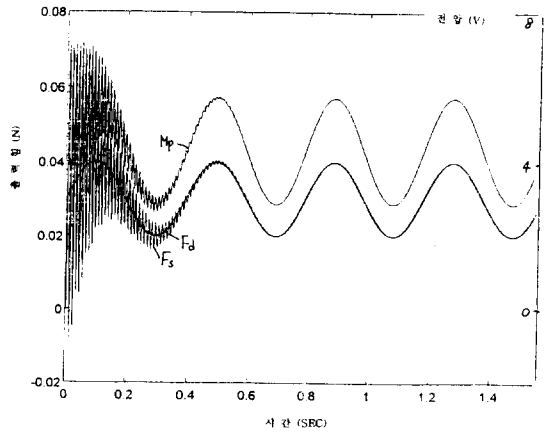


그림 14. 퍼지제어 결과  
Fig. 14. Result of Fuzzy Controller

에서 목표치의 주파수가  $f=2.5$  Hz인 경우는 PID 제어가 목표와 일치하고, 최적제어는 발산하며 퍼지제어도 PID 제어와 거의 동일한 제어성능을 나타냄을 알 수 있다.

**4.3. 움직이는 대상물을 일정 힘으로 잡는 문제**

이 절에서는 가볍고 변형되기 쉬운 물체나 운동하고 있는 작은 생물을 상하지 않고 잡는 것을 가정하여 운동 대상물에 대하여 일정 힘을 보지, 제어하는 문제를 검토한다. 구체적으로는 핑거에 의해 0.03N의 힘으로 파지 된 물체가 핑거의 0.01N의 힘을 주는 정현파 상태 운동을 시작할 때 핑거 선단의 접촉력을 대상물에 대하여 항상 0.03N으로 보지 하도록 제어하는 것이다. 이 경우 대상물의 변위를 고려하여 2장



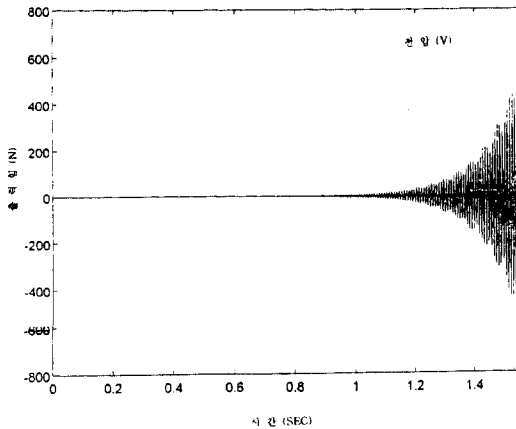


그림 15. 외부 힘 첨가의 경우 PID 제어 결과  
Fig. 15. Result of PID Controller For Addition Force By Moving object

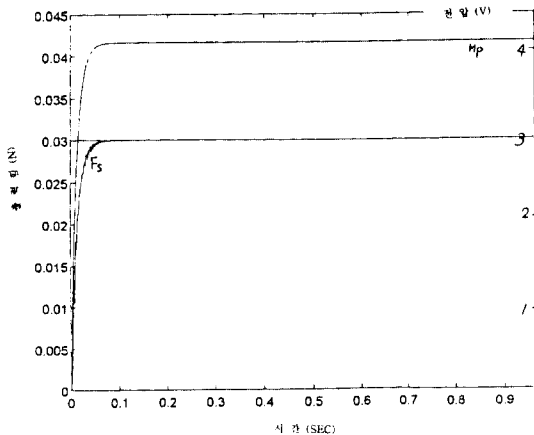


그림 16. 퍼지제어 결과  
Fig. 16. Result of Fuzzy Controller

에서 정의한 대상물이 핑거 선단에 가하는 힘  $F_s$ 를  $F_s = K_y(l, t) = K_y[y(x, t) - u(t)] \delta(x-l)$ 로 고친다. 여기서  $u(t)$ 는 대상물의 요동을 표시한다. 그림 15과 16은 각각 대상물의 변동 주파수를  $f=10\text{Hz}$ 로 바꾸고 제어 결과가 가장 좋은 이득을 조합한 경우의 결과이다. 그림 중의  $F_d$ 는 목표치,  $F_s$ 는 핑거에서 측정된 출력 선단힘이다. 대상물이 이와 같이 빠르게 운동을 하는 경우에 PID 제어를 채용하는 것은 선단의 힘을 일정치로 유지하는 것이 불가능하다. 즉, 대상물의 변동 주파수가 높아지면 선단 힘의 목표치로부터의 편차가 증대하는 경향이 있다. 하지만 퍼지 제어 경우는 거정 힘으로 제어하는 결과와 물체가 움직이는 변동 힘을 제어하는 문제도 동일한 제어 결과를 보여 퍼지 제어가 PID 제어나 최적 제어보다 모든 경우에 있어서 우

수함을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 바이물형 압전구동기를 칩에 부착한 소형 플렉시블 핑거에 대하여 최적 제어, PID 제어, 퍼지 제어를 적용하여 핑거 선단의 발생력을 미세하게 제어하는 문제에 대하여 연구하였다. 구체적인 예로 핑거의 선단에 0.03N의 미소력을 발생시키고 일정하게 유지하는 문제와 선단에 0.03N의 미소력을 발생시킨 후에 진폭 0.01N의 정현파형의 힘에 추종되는 문제에 적용하여 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 바이물형 압전소자를 구동기로 한 소형 플렉시블 핑거에 대하여 선단의 센서를 스프링으로 모델링하고 모드 급수 전개법을 적용한 후에 연속시간계를 이산시간계로 하여 취급하였다. 모의실험 결과 본 해석법을 적용함으로 소형 플렉시블 핑거의 선단 힘 제어 문제를 이론적으로 제어하는 것이 가능하다.
- 2) 최적 제어를 적용하여 미소한 선단 힘을 제어한 경우에는 일부에서 최적인 제어 결과가 얻어진다. 하지만 변동하는 힘의 경우 하중행렬을 조정해야 하는 문제가 발생하고 제어기 자체가 복잡하게 설계되므로 실 시스템에 적용이 불가능하다.
- 3) PID 제어를 적용하여 선단 힘을 제어한 경우는 변동하는 힘과 물체에 요동이 있을 때는 위상 지연 등의 제어성능이 떨어질 수 있었다.
- 4) 따라서 바이물형 압전소자를 구동기로 사용하고 퍼지 제어를 사용하면 핑거 선단의 미소 과피력을 고속, 고정도로 제어 가능하다.

## 참고문헌

1. J. K. Salisbury and J. J. Craig, "Force Control and Kinematic Issues," *The Int. J. of Robotics Reserach*, vol. 1, no. 1, pp. 4-17, 1982.
2. 福田, 下中, "人工指の協の調制御に關する基礎的研究" (第1報, 5本指多自由度の人工の手の機構と3次元把指の基礎的考え方) 日本機械學會論文 集 C編 vol. 53, no. 487 p.p. 731-738, 1987.
3. 今村, 金子, 横井, 谷江 "コンプライアンス 制御機能 を備えた 2本指 ハンドの 試作" 日本機械學會 論文 集 C編 vol. 55, no. 516, pp. 2083-2090, 1989.
4. P. Dario and G. Buttazzo, "An Anthropomorphic Robot Finger for Investigating Artificial Tactile Perception," *The Investigating Artificial Tactile Perception*, *The Int. J. of Robotics Reserach*, vol. 6, no. 3, pp. 25-48, 1987.

5. K Ikuta, D. C. Beard, S. Ho, and H. MOiin, "Direct Stiffness and Force Control of a Shape Memory Alloy Actuator and Application to Miniature Clean Gripper," ASME Winter Annual Meeting, pp. 241-260, 1989.
6. T. Toshikawa and K. Nagai, "Manipulating Grasping Forces in Manipulation by Multifingered Robot Hands," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 7, no. 1, pp. 67-77, 1991.
7. D. E. Whitney, "Force Feedback Control of Manipulator Fine Motions," ASME J. of Dynamic System, Measurement, and Control, June, pp. 91-97, 1977.
8. M. H. Raibert and J. J. Craig, "Hybrid Position Force Control of Manipulators," ASME, J. of Dynamic System, Measurement, and Control, Vol. 103, pp. 126-133, 1981.
9. J. K. Mills and A. Goldenberg, "Force and Position Control of Manipulator During Constrained Motion Tasks," *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, vol. 5, no. 1, pp. 30-46, 1981.
10. H. Seraji, "Adaptive Force and Position Control of Manipulators," *J. of Robotics Systems*, vol. 3, no. 4, pp. 551-578, 1987.
11. Z. W. Jiang, S. Chonan, "Position Control of a Flexible Arm Using Pizelectric Bimorph Cells," *Trans. ASME, J. of Dynamic System, Measurement, and Control*, vol. 113, no. 2, pp. 327-329, 1991.
12. S. Chonan, Z. W. Jiang and H. Sato, "End-Point Control of a Minature Flexible Arm Driven by Piezoelectric Bimorph Cells," The Proceedings of The First Japan-CIS Joint Seminar on Electromagnetomechanics in Structures, pp. 38-41, 1992.
13. 菅野道夫 "あいまい集合と 論理の 制御への 應用" 計測と制御 Vol. 18, No. 2, pp. 150-160, 1979
14. Jianxin Xu, F. Harashima "Fuzzy Control of Rule Based Dynamic System" 26th SICE Annual Conference vol. 26, no. 1, pp. 1237-1240, 1987.
15. F. Hashimoto, Jianxin Xu, "Stability and Controllability of Fuzzy Control System with Energetic Function," 9th SICE Symposium on Dynamical System Theory, vol. 12, pp. 261-264, 1986.
16. Jianxin Xu, H. Hashimoto, F. Harashima, "An Intelligent Learning Control System for Robotic Hands," *IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems*, pp. 131-136, 1988.
17. W. T. Miler, "Histolical Perspective and the Art in Robot Force Control" *Int. J. Robotic Research*, Vol. 6, No. 1, pp. 3-14, 1987.
18. 박현수, 이지홍, 채 석 "위치형과 속도형 제어규칙을 갖는 가변구조 퍼지제어기" 한국퍼지 및 지능 시스템학회 논문지 제 3권, 3호, pp. 56-67, 1993.
19. 이지홍 "제어량의 크기를 조건부에 포함하는 PI형 퍼지제어기" 대한전자공학회 논문지 제 30권, B편 5호, pp. 109-119, 1996.
20. "Physik Instrument," PI Press, 1997.
21. 류재춘, 박종국 "퍼지이론을 이용한 마이크로 로봇 핑거의 힘제어" 한국퍼지 및 지능 시스템학회 '96 춘계학술대회 Vol. 6, No. 1, pp. 97-100, 1996.
22. 류재춘, 박종국 "퍼지이론을 이용한 압전소자 플렉시블암의 위치제어" 한국퍼지 및 지능 시스템학회 '96 추계학술대회 Vol. 6, No. 2, pp. 176-179, 1996.

**류재춘 (Jae-Chun Ryu)** 정회원

1985년: 경희대학교 전자공학과 (공학사)  
 1988년: 경희대학교 전자공학과 (공학석사)  
 1993년: 경희대학교 전자공학과 (박사수료)  
 1992년~현재: 안양전문대학 전자계산과 조교수  
 주관심분야: 퍼지제어, 인공지능, 마이크로 마우스, 컴퓨터 네트워크.

**박종국 (Chong-Kug Park)** 정회원

본지 제 6권 3호 참조