

유전알고리즘을 이용한 비선형시스템의 퍼지 모델링 및 제어

이현식\*, 진강규\*\*

\*한국해양대학교 대학원 제어계측공학과, \*\*한국해양대학교 자동차·정보공학부

Fuzzy Modelling and Control of Nonlinear Systems Using a Genetic Algorithm

Hyun-Sik Lee\*, Gang-Gyoo Jin\*\*

\*Graduate School, Korea Maritime Univ. \*\*Div. of Automation & Information Eng., Korea Maritime Univ.

**Abstract** - This paper presents a scheme for fuzzy modelling and control of continuous-time nonlinear systems using a genetic algorithm. A fuzzy model is characterized by fuzzy "if-then" rules whose consequence part has a linear dynamic equation as subsystem of the system. The parameters of the fuzzy model are adjusted by a genetic algorithm. Then a tracking controller which guarantees stability of the overall system is designed. The simulation result demonstrates the effectiveness of the proposed method.

1. 서 론

최근 시스템들은 점점 그 규모가 커지고 복잡해짐에 따라 비선형 요소를 내포하고, 운전 중 시스템의 파라미터가 변하는 특성을 갖는다. 이 경우 기존의 제어기법으로 만족스러운 성능을 얻기가 어렵다. 이를 극복하기 위한 방편으로 퍼지이론, 신경회로망, 유전알고리즘 등을 결합하여 지능제어기(Intelligent Controller)를 개발하려는 연구가 있어 왔다[1]. 기존의 퍼지제어는 전문가의 지식을 직접 제어에 이용할 수 있고 제어대상의 모델을 필요로 하지 않은 장점이 있지만, 실제 문제에서는 전문가로부터 제어규칙을 얻는 것이 쉽지 않고 전체 시스템의 안정성을 증명하기가 대단히 어렵다.

일반적으로 제어기 설계 시 모델을 사용하면 더 나은 결과를 기대할 수 있으므로, 본 연구에서는 퍼지모델에 기초하여 안정한 퍼지 제어기를 설계하는 문제를 다룬다. 이를 위해 먼저 넓은 동작 영역에서 시스템과 유사한 동특성을 가지는 퍼지모델을 얻는다. 이 때 퍼지모델의 전건부와 후건부 파라미터들은 유전 알고리즘으로 최적 조정된다. 각각의 규칙에 대응되는 국부적 최적 상태제한 제어규칙을 얻고 이를 결합하여 퍼지 제어기를 얻는다. 그리고 전체 시스템의 안정성 해석이 검토된다. 본 방법의 유효성은 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 확인된다.

2. 퍼지 모델링

여기서는 저자들이 제안한 퍼지 모델링 기법을 수경 요약 정리한다. 자세한 것은 참고문헌[7]을 참조 바란다.

2.1 퍼지모델

단일 입출력 비선형시스템의 국부적 입출력 관계를 나타내는 선형 서브시스템을 퍼지규칙으로 결합한 퍼지모델은 다음과 같이 표시된다([5]를 참조).

$$R^i: \text{If } v_1 \text{ is } F_1^i \text{ and } \dots \text{ and } v_p \text{ is } F_p^i, \text{ then } A^i(p)y(t) = B^i(p)u(t). \quad (1 \leq i \leq l) \tag{1}$$

$$\text{단, } A^i(p) = \sum_{j=0}^m a_j^i p^j \tag{2a}$$

$$B^i(p) = \sum_{j=0}^m b_j^i p^j \tag{2b}$$

여기서  $R^i$ 는  $i$ 번째의 규칙,  $v = [v_1, \dots, v_p]^T \in R^p$ 는 퍼지 시스템의 입력,  $F_j^i$  ( $1 \leq i \leq l, 1 \leq j \leq p$ )는 퍼지집합,  $l$ 은 퍼지규칙의 개수이다. 한편  $p = d/dt$ 는 미분연산자,  $A^i(p)$ 와  $B^i(p)$ 는  $i$ 번째 규칙의 서로소인 다항식,  $a_j^i$  ( $1 \leq j \leq n$ )와  $b_j^i$  ( $1 \leq j \leq m$ )는 미지의 파라미터이며,  $n$ 과  $m$  ( $n > m$ )은 각각  $A^i(p)$ 와  $B^i(p)$ 의 차수이다. 이때 후건부 방정식의 구조와 차수는 원래의 시스템으로부터 사전에 알 수 있는 것으로 간주한다. 일반적으로  $v$ 는 여러 형태로 선택될 수 있는데 한 예로 시스템 상태벡터  $x$ 의 일부로 구성되거나,  $v = x$  또는  $v = [x^T u]^T$  등이 가능하다.

(1)의 후건부 방정식을 쌍선형(Bilinear) 변환하면 다음과 같게 된다.

$$\sum_{j=0}^m a_j^i \left( \frac{2}{T} \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} \right)^j y(k) = \sum_{j=0}^m b_j^i \left( \frac{2}{T} \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} \right)^j u(k) \tag{3}$$

여기서  $T$ 는 샘플링 시간이고  $z^{-1}$ 는 후향추이 연산자이다. 이를 정리하고 (1)을 다시 쓰면 다음과 같다.

$R^i$ : If  $v_1$  is  $F_1^i$  and  $\dots$  and  $v_p$  is  $F_p^i$  then

$$y^j(k) = - \sum_{j=1}^n c_j^i z^{-j} y(k) + \sum_{j=0}^m d_j^i z^{-j} u(k) \tag{4}$$

(4)의  $c_j^i, d_j^i$ 는 (3)의  $a_j^i, b_j^i$ 로부터 쉽게 구할 수 있고 그 관계식은  $c_j^i = \Theta_j^i(a_j^i)$  ( $1 \leq j \leq n$ ),  $d_j^i = \Sigma_j^i(a_j^i, b_k^i)$  ( $0 \leq j \leq m, 0 \leq k \leq m$ )로 정의된다.

만약 (4)에서 퍼지 시스템이 입력  $v = [v_1, v_2, \dots, v_p]^T$ 를 가지게 되면  $l$ 개의 규칙 전체에 대한 추론 결과 퍼지모델의 출력은 다음과 같게 된다.

$$y(k) = \frac{\sum_{i=1}^l \rho_i y^i(k)}{\sum_{i=1}^l \rho_i} \tag{5}$$

이 때  $i$ 번째 규칙의 적합도  $\rho_i$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$\rho_i = \prod_{j=1}^p F_j^i(v_j) \tag{6}$$

여기서  $F_j^i(v_j)$ 는  $v_j$ 에 대한 퍼지집합의 소속정도이고,

$$\sum_{i=1}^l \rho_i > 0 \text{로 간주한다.} \tag{2a}$$

## 2.2 유전알고리즘을 이용한 파라미터 추정

일반 퍼지모델이 얻어진다면 모델의 동특성이 시스템의 그것에 가깝도록 전건부 입력 변수들의 공간을 적절히 퍼지분할하고, 후건부 방정식의 계수를 최적 조정하는 작업이 필요한데 이는 복잡한 비선형 최적화 문제가 된다. 퍼지분할에 이용된 내부, 외부 퍼지집합의 소속함수는 각각 가우스와 시그모이드 형태의 함수를 이용하였다.

$$F_j^i(x) = e^{-\frac{(x-m_j)^2}{2(\sigma_j)^2}} \quad (7a)$$

$$F_j^i(x) = \frac{1}{1 + e^{-\mu_j(x-\sigma_j)}} \quad (7b)$$

따라서  $m_j^i, \sigma_j^i, \mu_j^i, o_j^i (1 \leq i \leq l, 1 \leq j \leq p)$ 가 전건부,  $a_j^i, b_j^i (1 \leq i \leq l, 1 \leq j \leq p)$ 가 후건부 방정식의 조정 파라미터가 된다. 한가지 알아야 할 사실은 유전알고리즘은 (2)의 연속 방정식의 계수를 직접 조정한다는 것이다. 비선형 최적화 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 유전알고리즘 (Genetic Algorithm: GA)[2,3]을 사용한다. 적응 메커니즘으로서 GA는 퍼지모델이 시스템의 동특성에 가까워지도록 계속적으로 퍼지집합의 파라미터들을 동시에 조정하게 된다.

집단이 진화해 가는 동안 GA는 개체간의 우열을 가리기 위하여 적합도 함수를 필요로 하는데, 이는 다음의 목적함수로부터 계산되어 진다. 이러한 형태는 온라인 추정치를 얻는데 적합하다[7].

$$J = \sum_{j=k}^N |y_p(j) - y(j)| \quad (8)$$

여기서  $y_p$ 는 시스템의 출력,  $W$ 는 데이터 윈도우의 크기이다.

## 3. 추종 제어기 설계

앞서 구한 퍼지모델의 후건부를 상태방정식으로 표시하면, 다음과 같은 퍼지 시스템을 얻을 수 있다.

$R^i$ : If  $v_1$  is  $F_1^i$  and ... and  $v_p$  is  $F_p^i$ , then

$$\dot{\hat{x}}^i = A^i \hat{x} + B^i u \quad (1 \leq i \leq l) \quad (9)$$

여기서  $x = [x_1, \dots, x_n]^T \in R^n$ 는 상태벡터,  $A^i, B^i$ 는 적절한 차원을 가지는 행렬이고, 모든 규칙에 대해 행렬의 쌍 ( $A^i, B^i$ )는 가제어한 것으로 가정한다.

일정한 외란이 부과되거나 계단상의 기준입력 변경에도 출력이 잘 추종하는 제어기를 설계하기 위해 새로운 상태 변수를 추가한다.

$$z = \int (y - y_r) dt \quad (10)$$

여기서,  $y = Cx$ 는 출력,  $y_r$ 는 기준입력이다. (10)의 양변을 한번 미분하고 (9)와 같이 정리하면 확장시스템은 다음과 같다.

$\hat{R}^i$ : If  $v_1$  is  $F_1^i$  and ... and  $v_p$  is  $F_p^i$ , then

$$\dot{\hat{x}}^i = \hat{A}^i \hat{x} + \hat{B}^i u - \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} y_r \quad (1 \leq i \leq l) \quad (11)$$

$$\text{단, } \hat{x} = \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} \in R^{n+1}, \hat{A}^i = \begin{bmatrix} A^i & 0 \\ C & 0 \end{bmatrix} \hat{B}^i = \begin{bmatrix} B^i \\ 0 \end{bmatrix}$$

(11)에서 확장시스템은 원래의 각 서브시스템이 가제어하

고  $\rho \begin{bmatrix} B^i & A^i \\ 0 & C \end{bmatrix}$   $n+1$ 이면 가제어하게 된다[4]. 만약 퍼지 시스템이  $v$ 의 입력을 가지면  $l$ 개의 규칙 전체에 대한 추론 결과는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{x} &= \frac{\sum_{i=1}^l \rho_i (\hat{A}^i \hat{x} + \hat{B}^i u - \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} y_r)}{\sum_{i=1}^l \rho_i} \\ &= \left( \sum_{i=1}^l \xi_i \hat{A}^i \right) \hat{x} + \left( \sum_{i=1}^l \xi_i \hat{B}^i \right) u - \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} y_r \end{aligned} \quad (12)$$

단,  $\xi_i = \frac{\rho_i}{\sum_{i=1}^l \rho_i}$ 이다.

(정리 1) 다음과 같은 시스템을 생각하자.

$$\dot{x} = Ax, x(t_0)$$

이 시스템의 평형상태  $x_e = 0$ 는 만약 다음 조건이 만족하는 스칼라 함수  $V(x)$ 가 존재하면 점근적으로 안정하다. 특히  $V(x)$ 를 Lyapunov함수라 한다.

- (1)  $V(x) > 0, x \neq 0$  그리고  $V(0) = 0$
- (2)  $V(x) \rightarrow \infty, \|x\| \rightarrow \infty$
- (3)  $\dot{V}(x) < 0, x \neq 0$

(정리 2) (12)에서 자유 시스템  $\dot{\hat{x}} = \left( \sum_{i=1}^l \xi_i \hat{A}^i \right) \hat{x}$ 의 평형상태  $\hat{x}_e$ 는 만약 모든 서브시스템에 대해

$$(\hat{A}^i)^T P + P \hat{A}^i - Q$$

를 만족하는 공통의 양의 한정행렬  $P$ 가 존재하면 점근적으로 안정하다. 이 때  $Q$ 는 양의 한정행렬이다. ■

(증명) 다음과 같은 Lyapunov함수를 생각하자.

$$V(x) = \hat{x}^T P \hat{x}$$

양변을 한 번 미분하면

$$\begin{aligned} \dot{V}(x) &= \hat{x}^T P \dot{\hat{x}} + \dot{\hat{x}}^T P \hat{x} \\ &= \hat{x}^T \left( \sum_{i=1}^l \xi_i (\hat{A}^i)^T \right) P \hat{x} + \hat{x}^T P \left( \sum_{i=1}^l \xi_i \hat{A}^i \right) \hat{x} \\ &= \sum_{i=1}^l \xi_i \left[ \hat{x}^T ((\hat{A}^i)^T P + P \hat{A}^i) \hat{x} \right] \end{aligned}$$

모든  $i = 1, 2, \dots, l$ 에 대해  $\dot{V}(x) < 0$ 이 성립되기 위해서는 다음 조건을 만족해야 한다.

$$(\hat{A}^i)^T P + P \hat{A}^i = -Q \quad \blacksquare$$

한편 (12)의 퍼지 시스템을 안정화시키는  $i$ 번째 제어규칙은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$L^i$ : If  $v_1$  is  $F_1^i$  and ... and  $v_p$  is  $F_p^i$ , then

$$u^i = -K^i \hat{x} = -K^i x + k_2^i \int (y_r - y) dt \quad (1 \leq i \leq l) \quad (13)$$

여기서  $K^i$ 는 각 규칙에 대응되는 게환 이득행렬이고

$$K^i = [K^i_1 \quad k^i]$$

마찬가지로 퍼지 제어기의 전체 출력은 다음과 같이 계산된다.

$$u = - \sum_{i=1}^k \xi_i K^i \hat{x} \quad (14)$$

여기서  $\xi_i$ 는 퍼지 시스템의  $\xi_i$ 와 같은 값을 사용하였다. (14)를 (12)에 대입하면 전체 시스템은

$$\dot{\hat{x}} = \left( \sum_{i=1}^k \xi_i \hat{A}^i \right) \hat{x} - \left( \sum_{i=1}^k \xi_i \hat{B}^i \right) \left( \sum_{i=1}^k \xi_i K^i \hat{x} \right) - \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} y_r$$

이 되고  $\sum_{i=1}^k \xi_i = 1$  인 관계가 성립되므로

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}} &= \left( \left( \sum_{i=1}^k \xi_i \hat{A}^i \right) \left( \sum_{j=1}^k \xi_j \right) - \left( \sum_{i=1}^k \xi_i \hat{B}^i \right) \left( \sum_{j=1}^k \xi_j K^j \right) \right) \hat{x} - \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} y_r \\ &= \left( \sum_{i=1}^k \xi_i \xi_i (\hat{A}^i - \hat{B}^i K^i) \right) \hat{x} - \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} y_r \\ &= \sum_{q=1}^k \xi_i \xi_j (\hat{A}^i - \hat{B}^i K^i + \hat{A}^j - \hat{B}^j K^j) \hat{x} - \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} y_r \\ &= \sum_{q=1}^k \sigma_q H_q \hat{x} - \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} y_r \end{aligned} \quad (15)$$

여기서

$$\sigma_q = \xi_i \xi_j \quad (16a)$$

$$H_q = \begin{cases} \hat{A}^i - \hat{B}^i K^i & , i=j \\ \hat{A}^i - \hat{B}^i K^i + \hat{A}^j - \hat{B}^j K^j & , i < j \end{cases} \quad (16b)$$

$$q = \sum_{i=1}^k (k-1) + (1 \leq i \leq l, 1 \leq j \leq l) \quad (16c)$$

(정리 3) (15)에서 자유 시스템  $\dot{\hat{x}} = \sum_{q=1}^k \sigma_q H_q \hat{x}$  평형

상태  $\hat{x}_e$ 는 만약 다음 관계식을 만족하는 공통의 양의 한정행렬 P가 존재하면 점근적으로 안정하다. 단, Q는 양의 한정행렬이다.

$$H_q^T P + P H_q = -Q \quad (1 \leq q \leq \frac{k(k+1)}{2})$$

(증명) 정리 2의 결과로부터 쉽게 증명될 수 있다. ■

(14)가 추종 제어기임을 밝히기 위하여 (15)의 양변을 한번 미분하면

$$\dot{\hat{x}} = \sum_{q=1}^k \sigma_q H_q \dot{\hat{x}} \quad (17)$$

이 되고 시스템이 점근적으로 안정하면, 행렬  $H_q$  고유치가 모두 부의 실수부를 가지므로 어떤 초기조건에 대해서

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{\hat{x}}(t) \rightarrow 0 \text{ 이 된다. } \dot{\hat{x}}(t) = \begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ y(t) - y_r(t) \end{bmatrix} \rightarrow 0, \text{ 즉,}$$

$\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) \rightarrow y_r(t)$ 이 되어 추종제어가 된다.

#### 4. 시뮬레이션

다음과 같은 비선형 진자시스템을 생각하자.

$$\ddot{\theta} + a_1 \dot{\theta} + a_2 \sin(\theta) = b_0 u \quad (18)$$

( $a_1 = 0.6, a_2 = 9.8, b_0 = 2.0$ )

퍼지 모델링 기법으로 다음과 같은 모델을 얻을 수 있었다.

R<sup>1</sup>: If  $x_1$  is ZO, then

$$\dot{x}^1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -9.27 & -0.59 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ 1.99 \end{bmatrix} u \quad (19a)$$

R<sup>2</sup>: If  $x_1$  is NB(or PB), then

$$\dot{x}^2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -8.47 & -0.89 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ 2.55 \end{bmatrix} u \quad (19b)$$

여기서  $x = [x_1 \quad x_2]^T = [\theta \quad \dot{\theta}]^T$  이다. 이 때 입력 변수  $x_1$ 의 공간은 ZO, NB(or PB)으로 퍼지분할되었고, 최적 조정된 소속함수는 그림 1과 같다.

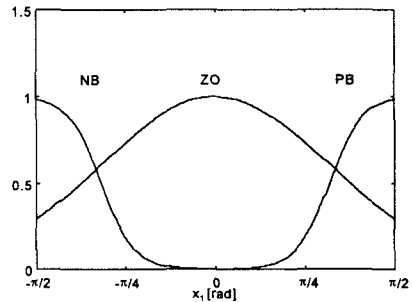


그림 1 입력공간의 퍼지분할  
Fig. 1 Fuzzy partition of the input space

이 때 다음과 같은 입력신호가 사용되었고

$$u(t) = \begin{cases} 1.5[\sin(4.5t) - \sin(1.5t)] & , 0 \leq t \leq 20 \\ \frac{4.9\pi}{4} + 0.2[\sin(4.5t) - \sin(1.5t)] & , 20 < t \leq 40 \end{cases} \quad (20)$$

GA의 파라미터로는 집단크기  $N=6$ , 재생산 계수  $n_i=1.7(1 \leq i \leq N)$ , 교배 확률  $P_c=1$ , 돌연변이 확률  $P_m=0.005$ 가 선택되었다[3].

그림 2는 퍼지모델을 검증하기 위한 것으로서, (20)과 같은 형태를 가지나 주파수가 다른 입력신호에 대해 시스템과  $x_0=0$ 에서 선형화한 모델, 시스템과 퍼지모델 간의 출력 오차를 그린 것이다.

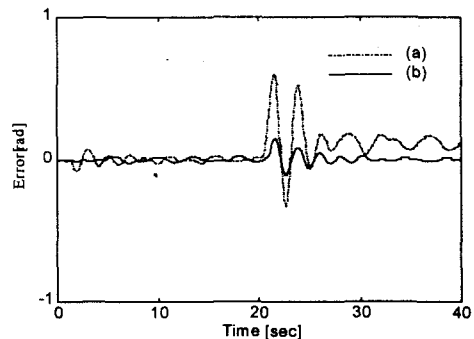


그림 2 (a) 시스템과 선형모델과의 오차, (b) 시스템과 퍼지모델간의 오차

Fig. 2 Error between (a) the system and linearized model, (b) the system and fuzzy model

기대할 수 있듯이 퍼지모델이 선형모델에 비해 전 동작범

위에서 시스템에 가까운 동특성을 가짐을 알 수 있다.  
(19)를 확장시스템으로 표시하면 다음과 같다.

$\hat{R}^1$ : If  $x_1$  is ZO, then

$$\hat{\mathbf{x}}^1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -9.27 & -0.59 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \hat{\mathbf{x}} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1.99 \\ 0 \end{bmatrix} u - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} y_r \quad (21a)$$

$\hat{R}^2$ : If  $x_1$  is NB(or PB), then

$$\hat{\mathbf{x}}^2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -8.47 & -0.89 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \hat{\mathbf{x}} + \begin{bmatrix} 0 \\ 2.55 \\ 0 \end{bmatrix} u - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} y_r \quad (21b)$$

(21)의 각 서브시스템에 대해 제어규칙을 얻고 이를 결합하면 다음과 같다.

$L^1$ : If  $x_1$  is ZO, then

$$u^1 = -K^1 \hat{\mathbf{x}} - K_{\dot{x}}^1 + k_2^1 \int (y_r - y) dt \quad (22a)$$

$L^2$ : If  $x_1$  is NB(or PB), then

$$u^2 = -K^2 \hat{\mathbf{x}} - K_{\dot{x}}^2 + k_2^2 \int (y_r - y) dt \quad (22b)$$

여기서  $K^1 = [9.063 \ 3.471 \ 14.142]$ ,  $K^2 = [11.857 \ 4.058 \ 15.812]$  이고 각각은 다음 이차형식의 성능지수를 최소로 하도록 선정되었다.

$$J^i = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} \hat{\mathbf{x}}^T Q^i \hat{\mathbf{x}} + u^T r^i u dt \quad (1 \leq i \leq 2) \quad (23)$$

단,  $Q^i \geq 0$ ,  $r^i > 0$

(22)의 제어가 각 서브시스템을 안정하게 하면 전체 시스템 또한 안정한 것으로 기대할 수 있으나, 이것은 일반적으로 성립되지 않는 사실이다[6]. 따라서 전체 시스템의 안정성을 살펴보기 위해  $H_q$  ( $1 \leq q \leq 3$ )를 구하면

$$H_1 = \hat{\mathbf{A}}^1 - \hat{\mathbf{B}}^1 K^1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -27.305 & -7.498 & -28.143 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (24a)$$

$$H_2 = \hat{\mathbf{A}}^1 - \hat{\mathbf{B}}^2 K^1 + \hat{\mathbf{A}}^2 - \hat{\mathbf{B}}^1 K^2 = \begin{bmatrix} 0 & 2 & 0 \\ -64.446 & -18.407 & -67.527 \\ 2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (24b)$$

$$H_3 = \hat{\mathbf{A}}^2 - \hat{\mathbf{B}}^2 K^2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -38.706 & -11.238 & -40.319 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (24c)$$

이 되고, 만약  $P = \begin{bmatrix} 2.990 & 0.107 & 2.410 \\ 0.107 & 0.0809 & 0.0189 \\ 2.410 & 0.018 & 3.484 \end{bmatrix}$  로 선정하면

$$H_1^T P + P H_1 < 0 \quad (25a)$$

$$H_2^T P + P H_2 < 0 \quad (25b)$$

$$H_3^T P + P H_3 < 0 \quad (25c)$$

즉 음의 한정행렬이 되어 점근적으로 안정하게 된다.

그림 3과 4는 기준입력이 계단상으로 변할 경우 전체 시스템의 응답특성을 알아보기 위하여 출력과 제어입력을 그린 것이다. 그림에서 확인할 수 있듯이 제안한 방법을 통해 만족스러운 응답을 얻을 수 있었다.

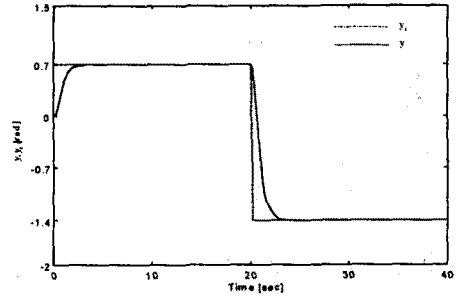


그림 3 계단상 입력에 대한 전체 시스템의 출력  
Fig. 3 Step response of the overall system

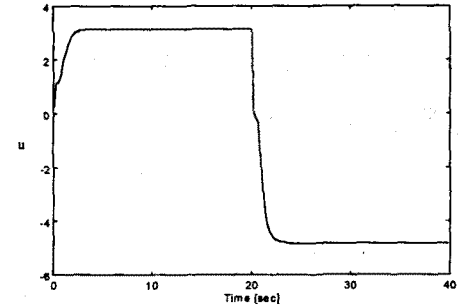


그림 4 제어입력  
Fig. 4 Control input

## 5. 결 론

본 연구에서는 유전알고리즘을 이용하여 비선형시스템의 퍼지모델을 얻고, 이에 기초하여 추종 제어기를 얻는 기법을 제안하였다. 제안된 퍼지 제어기는 Lyapunov법으로 안정도 해석이 가능하였다. 시뮬레이션을 행한 결과 추정된 퍼지모델은 단일 동작점에서 선형화한 모델보다 원래 시스템에 가까운 동특성을 나타내었고, 이를 이용한 퍼지 제어기는 계단상 기준입력의 변화에 양호한 추종 성능을 보였다.

### [참고문헌]

- [1] C. J. Harris, *Advances in intelligent control*, Taylor & Francis, Ltd., 1994
- [2] D. T. Pham and G. Jin, "Genetic algorithm using gradient-like reproduction operator," *Electronics Letters*, Vol. 31, No. 18, pp. 1558-1559, 1995
- [3] D. T. Pham and G. Jin, "A Hybrid Genetic Algorithm," *Proc. 3rd World Cong. on Expert Systems*, Seoul, Vol. 2, pp. 748-757, 1996
- [4] B. Poter and H. M. Power, "Controllability of multivariable systems incorporating integral feedback," *Electronics Letters*, Vol. 6, No. 22, pp. 689-690, 1970
- [5] T. Takagi and M. Sugeno, "Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control," *IEEE Trans. on Sys., Man and Cyber.*, Vol. 15, No. 1, pp. 116-132, 1985
- [6] K. Tanaka and M. Sugeno, "Stability analysis and design of fuzzy control systems," *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 45, pp. 135-156, 1992
- [7] 이현식, 진강규, "유전알고리즘을 이용한 비선형시스템의 연속시간 퍼지 모델링," 제 12회 한국자동제어학술회의 논문집, Vol. 2, pp. 1473-1476, 1997