

화력발전소 드럼의 수위제어를 위한 퍼지 제어기의 설계

(Fuzzy Controller Design for Water Level Control of Power Plant Drum)

이상혁*

(Sang - Hyuk Lee)

요 약

본 논문에서는 비최소위상 시스템으로 표현되는 화력발전소 드럼의 수위제어를 위한 퍼지 제어기를 제안한다. 제안된 방법은 T. Takagi와 M. Sugeno의 퍼지모델을 기반으로 수행된다. 그리고 기존의 PID 및 LQ 제어기법을 적용한 방식과 비교하여 제안된 방법의 개선된 특성을 시뮬레이션 결과로부터 검증하였다.

Abstract

In this paper, we propose a fuzzy controller design method for the water level control of the power plant drum in the form of nonminimum phase system. The proposed method is based on T. Takagi and M. Sugeno's fuzzy model. And we illustrate the improved characteristics as the simulation results, comparing with the conventional the PID and LQ controller design methods.

Key Words : fuzzy controller, drum, water level control, nonminimum phase.

1. 서 론

화력발전소에서 드럼, 상승관 및 하강관의 역할은 절단기로부터 공급받은 물을 수증기로 변환하여 다음 공정인 과열기로 보내주는 것이며, 상승관에서 노내의 연소열을 받아 포화증기와 포화수가 섞인 상태가 되어 드럼으로 유입된다. 드럼에서는 물과 증기가 분리되고 분리된 증기는 과열기에서 더욱 가열되어 과열증기가 되는 과정을 거친다. 발전소의 보일러 제

어시스템에서 드럼 수위제어는 매우 중요한 부분을 차지한다. 만일 급수량이 많아 수위가 과도하게 높아지면 물이 과열기로 유입되고 터빈에 손상을 주게 된다. 반대로 급수량이 부족할 경우 과열기의 관을 과열시킬 우려가 있다. 결국 드럼수위의 불안정은 발전소 전체에 대하여 영향을 미치게 되고, 안정한 제어를 위해서는 정확한 동특성 해석이 필요하다[1-4].

드럼 시스템 자체에 대한 모델링 그리고 제어기법은 많은 연구자들에 의하여 제안되었으나[1-3], 모델의 복잡성 및 비 최소 위상특성 때문에 제어하기가 쉽지 않았다. 실제 운전의 경우, 수동운전은 운전조건의 변화에 대하여 운전자의 경험과 개인적 능력에 의하여 제어성능이 결정된다. 따라서 이러한 전문가의 지식을 이용한 지능제어기법이 드럼의 수위를 제어

* 주저자 : 부산대학교 전기공학과, 기금교수
Tel : 051-510-2497, Fax : 051-513-0212
E-mail : leehyuk@pusan.ac.kr
접수일자 : 2002년 8월28일
1차심사 : 2002년 9월 9일
심사완료 : 2003년 1월13일

화력발전소 드럼의 수위제어를 위한 퍼지 제어기의 설계

하는데 적절하며, 본 논문에서는 이와 같은 필요성에 근거하여 퍼지 제어기법을 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 제어대상인 드럼의 모델링을 기술하였다. 비선형 방정식으로 표현된 모델의 선형화 모델로 표현하며, 시스템이 비 최소 위상특성을 나타냄을 모델확인을 통하여 확인한다. 3장에서는 드럼의 수위제어를 위한 퍼지 제어기를 제안한다. 현재의 수위에 대한 정보뿐 아니라 수위에 영향을 미치는 선행신호의 정보를 이용하여 퍼지 제어기를 설계하였다. 4장에는 제안된 방법을 이용한 시뮬레이션을 수행하였으며, 5장에서 결론을 맺는다.

2. 드럼의 모델링

보일러 드럼 내에서의 유체의 상태변화는 열과 질량의 전달과정이 빠르게 수반하기 때문에 일반적으로 열적 평형상태로 가정하며, 그림 1은 드럼의 구성도를 나타낸다[1-3].

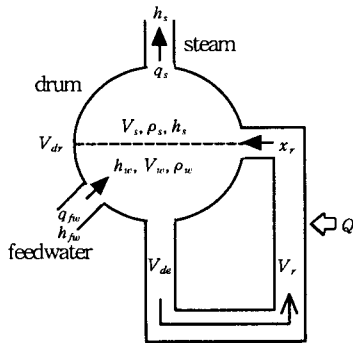


그림 1. 화력발전소 드럼 구성도
Fig. 1. Power plant drum diagram

보일러 드럼 전체에 대한 에너지 평형식과 질량 평형식을 나타내면 다음과 같다[4].

$$\frac{d}{dt}(\rho_s V_s h_s + \rho_w V_{wt} h_w) = Q_{mf} + q_{fw} h_{fw} - q_s h_s \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt}(\rho_s V_s + \rho_w V_{wt}) = q_{fw} - q_s \quad (2)$$

여기서, ρ [KJ/m³]는 밀도, V [m³]는 부피, h [KJ/Kg]는 엔탈피, q [Kg/s]는 질량 흐름률, Q_m [KJ/s]는 상승관에서 내부 유체로의 열량 흐름률이며, 아래첨자 s, w, fw 는 증기, 물, 급수를 각각 나타낸다.

그리고 드럼의 부피 V_{dr} [m³], 드럼 내부의 물부피 V_w [m³], 상승관의 부피 V_r [m³], 하강관의 부피 V_{dc} [m³] 그리고 상승관 내부의 증기 부피비 a_m 을 이용하여 전체 증기 부피와 물 부피를 나타내면 다음과 같고,

$$V_{st} = V_{dr} - V_w + a_m V_r \quad (3)$$

$$V_{wt} = V_w + V_{dc} + (1 - a_m) V_r \quad (4)$$

전체 물과 증기, 드럼 내부의 물, 상승관 전체, 그리고 상승관 내부의 증기에 대한 각각의 질량 평형식을 구한 후, 이상의 결과를 이용하면 다음과 같은 드럼 모델에 대한 비선형 상태방정식을 구성할 수 있다[4].

$$a_{11} \frac{dP}{dt} = h_c \rho_s q_{fw} - h_c \rho_w q_s + (\rho_w - \rho_s)[Q_{mf} - (h_w - h_{fw})q_{fw}] \quad (5)$$

$$a_{21} \frac{dP}{dt} + a_{22} \frac{dV_w}{dt} + a_{23} \frac{dX_r}{dt} = q_{fw} - X_r q_r \quad (6)$$

$$a_{31} \frac{dP}{dt} + a_{33} \frac{dX_r}{dt} = Q_{mf} - (h_w - h_{fw})q_{fw} - h_c X_r q_r \quad (7)$$

$$a_{44} \frac{dq_s}{dt} = Q_{gm} - Q_{mf} \quad (8)$$

여기서,

$$a_{11} = V_{wt}(\rho_w^2 - \rho_w \rho_s) \frac{dh_w}{dP} + V_{st} \left[h_c \rho_w \frac{d\rho_s}{dP} + (\rho_w^2 - \rho_s^2) \frac{dh_s}{dP} \right],$$

$$a_{21} = V_r a_m \frac{d\rho_s}{dP} - V_r (\rho_w - \rho_s) \frac{\partial a_m}{\partial P},$$

$$a_{22} = \rho_w,$$

$$a_{23} = V_r (\rho_w - \rho_s) \frac{\partial a_m}{\partial X_r},$$

$$a_{31} = V_r h_c \left(a_m \frac{d\rho_s}{dP} + \rho_s \frac{\partial a_m}{\partial P} \right) + V_{wt} \rho_w \frac{dh_w}{dP} + V_{st} \rho_s \frac{dh_s}{dP},$$

$$a_{33} = V_r h_c \rho_s \frac{\partial a_m}{\partial X_r},$$

$$a_{44} = MC.$$

위 모델에서 상태변수는 $x^T = [P \ V_w \ X_r \ q_s]$ 로서 P [MPa]는 드럼의 압력, V_w [m³]는 드럼 내부의 물 부피 즉 수위를 나타내고, X_r 는 증기질로서 단위체 적에서의 수량에 대한 증기량의 비율을 뜻한다. q_s [Kg/s]는 드럼에서 빠져나가는 증기의 질량 흐름률을 나타낸다. 입력변수는 $u^T = [Q \ P_{cv} \ q_{fw}]$ 이며, Q [KJ/s]는 열량, P_{cv} [%]는 주증기 제어밸브의 위치, q_{fw} [Kg/s]는 급수량이다. 그리고 M [kg]는 상승관의 질량, C [kJ/kg°C]는 상승관의 비열이고, h_c [KJ/Kg]는 증발에 필요한 엔탈피량이다. 이상의 비선형 방정식을 동작점에서의 상태변수와 입력변수에 대하여 선형화 하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\delta \dot{x} = A \delta x + B \delta u \tag{9}$$

$$\delta y = C \delta x \tag{10}$$

여기서, $\delta x = x - x^*$, $\delta u = u - u^*$, $\delta y = y - y^*$ 이고, x^* , u^* 는 동작점을 나타내며, $A = \left. \frac{\partial f(x, u)}{\partial x} \right|_{\substack{x=x^* \\ u=u^*}}$, $B = \left. \frac{\partial f(x, u)}{\partial u} \right|_{\substack{x=x^* \\ u=u^*}}$, $C = [0 \ 1 \ 0 \ 0]$ 이다.

본 논문에서는 실제 화력발전소 정격출력의 95[%]의 동작점에서 $x^* = [17.7 \ 18.5 \ 0.243457 \ 393]^T$ 의 상태변수 값과 $u^* = [486491 \ 58.3759 \ 410.95]^T$ 의 입력변수 값을 이용하여 다음과 같은 시스템 행렬을 구성하였다[4].

$$A = \begin{bmatrix} 5.843 \times 10^{-3} & 0 & 0 & -2.53310^{-4} \\ -5.735 \times 10^{-2} & 0 & -33.19 & 7.236 \times 10^{-3} \\ -3.69 \times 10^{-4} & 0 & -0.2746 & 6.745 \times 10^{-5} \\ 0.1845 & 0 & 0 & -1.667 \times 10^{-2} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 2.42 \times 10^{-7} & 0 & -4.633 \times 10^{-5} \\ 4.531 \times 10^{-7} & 0 & -8.672 \times 10^{-5} \\ 1.536 \times 10^{-8} & 0 & -2.267 \times 10^{-5} \\ 0 & 5.681 \times 10^{-2} & 0 \end{bmatrix}$$

$$C = [0 \ 1 \ 0 \ 0]$$

그리고 주어진 선형모델의 전달함수를 확인하면 다음과 같다.

$$H_1(s) = \frac{y(s)}{u_1(s)} = \frac{N_1(s)}{D(s)} \tag{11}$$

$$H_2(s) = \frac{y(s)}{u_2(s)} = \frac{N_2(s)}{D(s)} \tag{12}$$

$$H_3(s) = \frac{y(s)}{u_3(s)} = \frac{N_3(s)}{D(s)} \tag{13}$$

여기서,

$$N_1(s) = 4.531 \times 10^{-7} s^3 - 3.944 \times 10^{-7} s^2 - 4.951 \times 10^{-9} s - 5.834 \times 10^{-12}$$

$$N_2(s) = -5.551 \times 10^{-17} s^3 + 0.0004 s^2 - 1.587 \times 10^{-5} s + 1.339 \times 10^{-7}$$

$$N_3(s) = -8.672 \times 10^{-5} s^3 + 0.00073 s^2 + 8.038 \times 10^{-6} s - 3.206 \times 10^{-8}$$

$$D(s) = s^4 + 0.2854 s^3 + 0.002922 s^2 - 1.391 \times 10^{-5} s$$

선형 모델식 (11), (12) 및 (13)에 대해 계단입력을 인가하였을 때의 응답특성은 그림 2, 3, 및 4와 같다. 이 그림들로부터 드럼의 수위가 일정시간 감소 후 증가하거나, 증가 후 감소하는 팽창 및 수축현상을 확인할 수 있다. 이러한 현상이 드럼 수위제어를 용이하지 않게 하는 요소가 된다. 그리고 이 시스템에서 극점은 $\{0, -0.2746, 0.0035, -0.014\}$ 이고, 영점의 경우는 $H_1(s)$ 는 $\{0.8827, -0.011, -0.0013\}$, $H_2(s)$ 는 $\{7.2059 \times 10^{12}, 0.03, 0.01\}$ 이고, $H_3(s)$ 는 $\{8.43, -0.014, 0.003\}$ 이므로 비 최소 위상 시스템임을 확인할 수 있다.

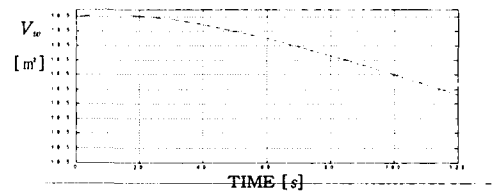


그림 2. 열량(Q) 변화시 수위의 스텝응답
Fig. 2. Water level step response due to Q

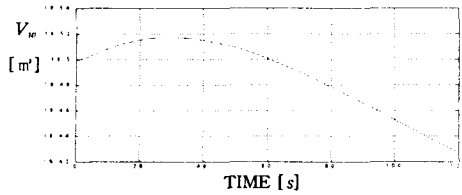


그림 3. 주증기제어밸브위치(P_{cv})변화시 수위의 스텝응답

Fig. 3. Water level step response due to P_{cv}

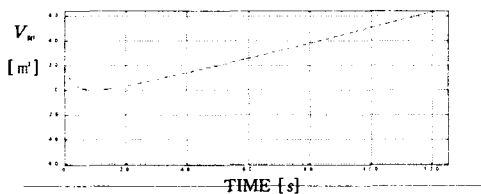


그림 4. 급수량(q_{fw}) 변화시 수위의 스텝응답

Fig. 4. Water level step response due to q_{fw}

3. 퍼지 제어기법을 이용한 드럼 수위 제어

비 최소 위상 시스템에 대하여 기존의 제어기법을 적용할 경우 적절한 성능을 얻기가 용이하지 않다. PID 제어기의 경우 또한 초기 변동상황에 부합되도록 진-지상기법을 추가하는 등 별도의 고려를 해주어야하며, 현장에서는 수동운전의 경우 운전자의 경험과 지식에 의존한 형태로 이루어지고 있다. 따라서 이를 고려한 지능제어기를 설계하는 것이 바람직하다. 시스템이 비 최소 위상 시스템을 감안하여 시스템에 영향을 미치는 앞먹임 제어를 추가하는 것이 요구된다. 드럼 수위에 영향을 미치는 선행신호로는 주증기 제어밸브위치 P_{cv} [%]가 있다. P_{cv} 의 값의 변동에 대하여 드럼 수위는 지연시간이 흐른 후 영향을 받게되며, P_{cv} 의 변화율은 수위를 결정하는 정보량이 된다.

그림 3으로부터 P_{cv} 가 증가할 경우 드럼 내부의 증기량이 빠져나가서 수위가 감소할 것 같지만 수축, 팽창현상에 의하여 오히려 수위는 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이런 현상은 비 최소 위상특성 때문에 일어나는 효과이다. 따라서 제어입력에 P_{cv} 의 변화를

고려해주어야 하며 퍼지 제어기의 규칙을 설정할 때 P_{cv} 의 변화분 역시 고려의 대상이다. 드럼 내부의 수위는 측정가능하고 P_{cv} 의 위치 또한 측정가능하므로 이 두 개의 변화량을 퍼지 규칙의 조건부로 설정하고 다음과 같은 소속함수를 정의하였다.

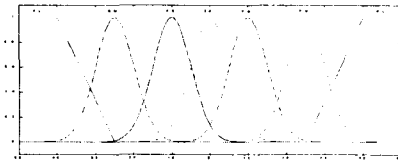


그림 5. 수위의 소속함수

Fig. 5. Membership function of water level

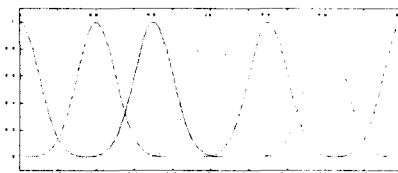


그림 6. P_{cv} 의 소속함수

Fig. 6. Membership function of P_{cv}

본 논문에서는 Takagi 와 Sugeno의 결과를 이용하여 두 개의 입력과 하나의 출력을 갖는 시스템의 제어기를 다음과 같이 나타낼 수 있다[5].

- If V_w is $M_{V_w}^1$ and P_{cv} is $M_{P_{cv}}^1$ then q_{fw} is K_1
- If V_w is $M_{V_w}^2$ and P_{cv} is $M_{P_{cv}}^2$ then q_{fw} is K_2
-
- If V_w is $M_{V_w}^{49}$ and P_{cv} is $M_{P_{cv}}^{49}$ then q_{fw} is K_{49}

본 논문에서는 위의 결과로부터 표 1과 같은 제어 규칙을 구성하였다. 주어진 V_w 와 P_{cv} 의 값으로부터 제어기의 출력은 표 1로부터 추론될 수 있다. 여기서, 조건부 $M_{V_w}^i$ 와 $M_{P_{cv}}^i$ 는 다음의 집합 {NL, NM, NS, ZE, PS, PM, PL}에 속하고, 제어이득 K_i 도 이 집합의 원소를 나타낸다. 그리고 제어입력은 다음과 같이 주어진다[6].

$$q_{fw}(t) = \frac{\sum_{i=1}^{49} \mu_i(\theta) K_i \theta}{\sum_{i=1}^{49} \mu_i(\theta)} \quad (14)$$

여기서, $\theta^T = [V_w P_{cv}] = [\theta_1 \theta_2]$,

$\mu_i(\theta) = \prod_{j=1}^2 M_j^i(\theta_j)$, $M_j^i(\theta_j)$ 는 θ_j 에 대한 소속함수의 적합도를 나타내고, $\sum_{i=1}^{49} \mu_i(\theta) > 0$, $\mu_i(\theta) \geq 0$ 이다.

표 1. 퍼지규칙
Table 1. Fuzzy rule

$V_w \backslash P_{cv}$	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
NL	NL	NL	NM	NM	NS	NS	ZE
NM	NM	NM	NM	NS	NS	ZE	ZE
NS	NM	NM	NS	NS	ZE	ZE	PS
ZE	NS	NS	NS	ZE	ZE	PS	PS
PS	NS	NS	ZE	ZE	PS	PS	PM
PM	ZE	ZE	ZE	PS	PS	PM	PM
PL	ZE	PS	PS	PM	PM	PL	PL

4. 시뮬레이션 및 검토

제안된 방법의 유용성을 보이기 위하여 95[%]의 동작점 부근에서 부하가 변동할 경우에 대해서 시뮬레이션을 실시하였다. 사용된 데이터는 다음과 같고,

$$V_{dr} = 35.58[m], V_{dc} = 45.24[m], V_r = 126.2[m]$$

표 2는 보령 화력발전소 1, 2호기의 각 동작점에 대한 변수값 들을 나타낸 것이다.

그리고 동일한 모델에 대하여 PID 제어기와 LQ 제어기 그리고 퍼지 제어기의 성능을 비교하였다. 시스템이 민감하기 때문에 모의실험은 동작점 부근에서 실시하였다. 수위에 직접 영향을 미치는 P_{cv} 의 값을 외란으로 간주하여 동작점의 값인 58.3759를 약간 벗어난 59[%]의 외란을 인가하고, Q 는 486490[KJ/s]의 조명·전기설비학외논문지 제17권 제1호, 2003년 1월

열량을 인가하였다. 또한 상태변수의 초기치는 (17.74 18.49 0.2435 396)으로 설정하였다. PID 제어기의 경우 출력인 드럼 수위의 정보를 제한 받아서 급수량의 조절을 위한 정보로 이용하므로 다른 두 개의 입력 Q 와 P_{cv} 의 변화량은 고려하지 않았다.

표 2. 동작점 에서의 변수값
Table 2. Values at the operating points

변수 \ %	50	75	95	100	110
P_{dr}	17.1	17.5	17.75	18.1	18.12
V_w	18.5	18.5	18.5	18.5	18.5
X_r	0.1872	0.2209	0.2435	0.2476	0.2518
q_s	195	303.14	393	410.95	430
Q	246022	378085	486492	503169	526156
P_{cv}	1.3691	32.6481	58.3759	62.4702	67.9354
q_{fw}	195	303.14	393	410.95	430

PID 조정계수는 반복시행에 의해서 각각 $K_p = 10$, $K_i = 1$, $K_d = 1$ 로 설정하였다. 설계된 PID 제어기를 적용한 경우의 드럼수위 응답은 그림 7에 나타내었다. 그림 7에 나타난 것과 같이 PID 제어기의 경우 출력 값인 수위에 대한 정보만 이용하게 되므로 초기의 환경변화에 대하여 적절한 제어성능을 나타내지 못하였다. 그리고 상태 변수량을 모두 측정가능 하다고 가정하여 LQ 제어기를 설계할 경우[7], 상태변수와 입력변수에 대한 가중치는 다음과 같다.

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

LQ 제어기를 적용할 경우의 드럼 수위응답은 그림 8과 같다. LQ 제어기의 경우에서도 현재의 상태 값을 고려한 상태 제한 구조이므로 P_{cv} 의 초기변화에 대하여 적절한 제어성능을 나타내지 못함을 확인할 수 있다. 마지막으로 제안된 퍼지 제어기를 적용한 결과를 그림 9에 나타내었다. 퍼지 제어기의 경우 시스템 검증을 통하여 비 최소 위상특성을 고려하여 선행신호인 P_{cv} 의 변화량을 정보로 활용하여 제어기를 설

화력발전소 드럼의 수위제어를 위한 퍼지 제어기의 설계

계하므로 초기의 환경변화에 적절히 대응함을 그림 9로부터 확인할 수 있다.

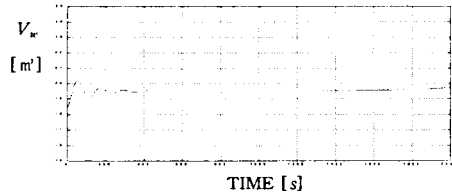


그림 7. PID를 이용한 드럼 수위제어
Fig. 7. Drum water level(PID)

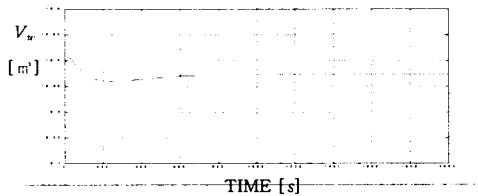


그림 8. LQ를 이용한 드럼 수위제어
Fig. 8. Drum water level(LQ)

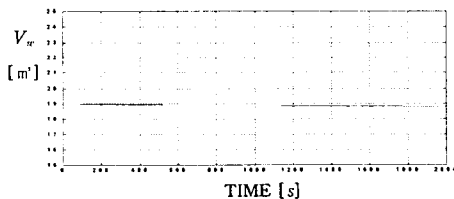


그림 9. 퍼지 규칙을 이용한 드럼수위제어
Fig. 9. Drum water level(Fuzzy control)

5. 결 론

본 논문에서는 화력발전소의 드럼의 수위제어를 위한 퍼지 제어기 설계방법을 제안하였다. 제안된 방법은 드럼 수위에 영향을 미치는 밸브 위치 P_{cv} 의 정보를 미리 감안하여 퍼지규칙에 추가하였다. 이상의 결과는 비교한 기존 제어기의 성능보다 향상된 결과를 시뮬레이션 결과로부터 확인하였다. 추후의 연구 과제로는 좀더 넓은 범위의 동작점에서 동작하는 수위 제어기를 제안하는 연구가 수행되어야 할 것이다.

References

- [1] K. L. Chien, E. I. Ergin, C. Ling, and A. Lee, "Dynamic Analysis of a Boiler", Trans. Amer. Soc. Mech. Engrs. 80, pp. 1809-1819, 1958.
- [2] R. Dolezal and L. Varcop, Process Dynamics, Elsevier Publishing Co. Ltd., 1970.
- [3] K. J. Astrom and Eklund, "A simplified Non-linear Model of a Drum Boiler-turbine", Int. J. Contr., vol. 16, no. 1, 1972.
- [4] 한국전력공사, 보일러 계수 추정에 의한 최적 보일러 제어기 개발, 한국전력공사 기술연구원, 1993.
- [5] T. Takagi and M. Sugeno, "Fuzzy Identification of Systems and its Applications to Modeling and Control", IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., vol. 15, no. 1, pp. 116-132, 1985.
- [6] J. S. R. Jang, C. T. Sun, and E. Mizutani, Neuro-Fuzzy and Soft computing, Prentice-Hall, 1997.
- [7] F. L. Lewis, Optimal control, John Wiley & Sons, 1986.

◇ 저자소개 ◇

이 상 혁 (李相赫)

1988년 충북대학교 전기공학과졸업, 1991년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사), 1996년~1999년 (주)하우 기업부설연구소 책임 연구원, 1999년~2000년 (주)지엔티씨 기술이사, 2000년~ 현재 부산대학교 산업자동화 및 정보통신분야 인력양성사업단 기금교수. 관심분야는 강인제어, 최적화이론, 관측기설계, 퍼지이론.