

論文93-30B-7-4

## 공정제어를 위한 퍼지 적응제어기의 설계

### (The Design of a Fuzzy Adaptive Controller for the Process Control)

李鳳國\*, 許旭烈\*\*

(Lee Bong kuk and Huh Uk youl)

#### 要約

이 논문에서는 큰 시간지연과 비모델화 성분(unmodeled dynamics)의 특성을 갖는 공정제어 시스템을 위한 퍼지 적응제어기를 제안하였다. 퍼지 적응제어기는 자기 동조 적응제어부와 퍼지 조절부로 나누어진다. 제어부는 에뮬레이터를 이용한 GMV(generalized minimum variance)방식을 적용하였고, 파라미터 추정을 위하여는 지수가중 최소자승법을 사용하였다. 자기동조 제어기는 연속시간 영역에서 설계하였으며 이산화 된 혼합형에 의하여 실현하였다. 실제 시스템의 적용을 고려하여 비선형 특성을 갖는 공정의 동작점에 따라 자기동조 제어 설계 파라미터를 퍼지 추론에 의하여 조절함으로써 강인성이 향상되도록 설계하였다. 모의 실험을 통하여 퍼지 적응제어기의 강인성 특성을 조사하였으며, 마지막으로 전기로에 적용하였다. 실험 결과 퍼지 적응제어기는 수치형 자기동조 제어기와 PI 제어기에 비하여 우수한 성능을 가지고 있음을 보인다.

#### Abstract

In this paper, a fuzzy adaptive controller is proposed for the process with large delay time and unmodelled dynamics. The fuzzy adaptive controller consists of self tuning controller and fuzzy tuning part. The self tuning controller is designed with the continuous time GMV(generalized minimum variance) using emulator and weighted least square method. It is realized by the hybrid method. The controller has robust characteristics by adapting the inference rule in design parameters. The inference processing is tuned according to the operating point of the process having the nonlinear characteristics considering the practical application. We review the characteristics of the fuzzy adaptive controller through the simulation. The controller is applied to practical electric furnace. As a result, the fuzzy adaptive controller shows the better characteristics than the simple numeric self tuning controller and the PI controller.

\*準會員, 金星産電(株) 研究所  
(R&D Lab. Gold Star Industrial Systems)  
接受日字: 1993年 3月 3日

\*\* 正會員, 仁荷大學校 電氣工學科  
(Dept. of Elec. Eng., Inha Univ.)

## I. 서론

퍼지 이론은 여러 분야에 다양한 방법으로 적용되어 왔다. 특히, 제어계에서는 비선형성이 강하고 모델링이 어려운 시스템에 적용하여 그 효과를 인정받고 있으며 산업 기술계의 중요한 요소인 공정제어 분야에도 그 적용 대상이 되고 있다.<sup>[1]</sup> 본 논문에서는 공정제어 시스템(process control system)에 대한 적응제어 시스템의 강인성을 향상 시키기위하여 퍼지 이론을 적용하였다. 일반적인 공정제어 시스템중 특히 온도 제어 시스템은 비선형성과 비모델화 성분등의 특성을 가지고 있어 제어하기가 어려운 시스템 중의 하나이다. 특히 제어기 설계시 시간지연 요소에 대한 고려가 많이 필요하다. 현재까지도 온도 공정제어에서는 PID제어와 그 변형된 기법들이 사용되고 있다.<sup>[2]</sup> 그러나 PID제어 방식으로는 시간지연 요소에 대한 충분한 제어가 곤란하다. 최근에 제어 이론과 디지털 컴퓨터 기술의 발달로 고기능 제어 기법을 적용할 수 있게 되었다. 시간지연 요소를 고려한 이산형 적응제어기에 의한 온도 공정제어가 제안되었다.<sup>[3]</sup>

자기동조 적응제어기는 설계 영역에 따라 연속형과 이산형으로 분류할 수 있는데, 대부분의 방식은 이산형 영역에서 설계되었다. Astrom<sup>[4]</sup>은 최소 분산(minimum variance) 자기동조 제어 방식을 제안하였고, Goodwin<sup>[5]</sup>은 극 배치(pole placement)적응제어기를 구성하였으며 Clarke<sup>[6]</sup>는 예측 제어를 이용한 자기동조 제어기를 제안다. 그러나 이들은 이산형 설계에서의 문제점들을(주기 선택, 비 최소위상화, 시간지연 추가, 계수변화에 따른 감도)지니고 있으며 Gawthrop<sup>[7]</sup>은 이러한 문제들을 해결하기 위하여 연속형 자기 동조 제어기를 제안하였다. 한편 퍼지이론과 신경회로망에 의한 제어 방식이 적용되기 시작하였다. 명<sup>[8]</sup>은 온도 공정제어를 위한 퍼지제어기를 제안하였는데, 소속함수(membership function)의 결정이 용이하지않은 문제가 있다. 문<sup>[9]</sup>은 전기를 위한 퍼지-뉴럴 제어기를 제안하였는데, 소속함수와 제어 이득이 신경회로망에 의하여 학습되도록 하였다. 또한 소속함수의 학습을 위하여 주<sup>[10]</sup>는 최적화 기법의 simplex 방법에 의한 결정을 하였고 Nomura<sup>[11]</sup>는 delta 규칙에 의한 결정법을 제안하였다. 그러나 이들의 대부분은 실시간 운영에 어려움이 많다.

이 논문에서는 공정제어를 위하여 퍼지 적응제어기를 제안하였다. 퍼지 적응제어기는 수치형 자기동조 적응제어부와 퍼지 추론 알고리즘부로 구성된다. 수

치형 적응제어부는 이산화 영역의 예측기에 해당하는 에플레이터를 이용한 GMV(generalized minimum variance) 제어기와 파라미터 추정을 위해 지수가중 최소자승 추정자를 이용하였으며 이산화 과정중에서는 안정한 파라미터 추정을 위해 제공된 방식을 채택하였다. 퍼지 추론 알고리즘부의 소속함수를 자동으로 원하는 값으로 결정하기 위하여 gradient 방법<sup>[12]</sup>에 의한 최적화 기법을 도입하였으며 추론부는 on-line 동작 중 시스템의 상태를 감독하며 제어 설계 파라미터를 퍼지 추론에 의하여 조절한다. 소속함수는 간단한 삼각형 형태를 이용하였다. 2장에서는 제안한 퍼지 적응제어기의 구조를 설명하였으며 3장에서는 퍼지 규칙의 구성과 소속함수의 자동동조에 대하여 설명하였고 4장의 사례 연구에서는 연속형, 혼합형, 이산형의 수치형 적응제어기의 비 모델화 성분에 의한 강인성과 제안한 퍼지 적응제어기의 특성을 조사 하였고 5장에서는 공정제어 시스템의 한 예인 전기로 제어 시스템에 제안한 알고리즘을 적용함으로써 성능을 평가 하였다.

## II. 적응제어기의 구성

### 1. 구성

퍼지 이론을 기존의 제어 시스템에 적용시키기 위하여는 크게 다음의 2가지 방법으로 분류할 수 있다.

①기존의 제어기를 대체하는 방법<sup>[1][8]</sup>

②기존의 제어기를 보완하거나 관리 하는 방법<sup>[14]</sup>

①에 의한 방법은 입력 변수를 퍼지 변수화하여 퍼지추론에 의하여 제어기 출력 변수를 결정하는 것이고, ②에 의한 방법은 제어기의 설계 요소를 퍼지 규칙에 의하여추론하여 결정하고 제어 출력은 수치형 제어기(PID 제어기 혹은 적응제어기)에 의하여 결정하는 것이다.

그런데 실제의 공정제어(process control)에 있어서 운전자(operator)는 제어기 자체를 선택하는 것보다는 미리 결정된 제어기의 운전 파라미터를 조정함으로써 제어 시스템을 효과적으로 운영하고 있다. 즉, 제어 시스템의 상태에 따라 운전자는 자신의 경험적 규칙을 제어 시스템에 도입하고 있는 것이다.

이 논문에서는 이러한 면에서 ②의 방법에 의한 퍼지 제어 시스템을 제안하여 퍼지 적응제어기를 구성하였다. 그림 1은 퍼지 적응제어기의 전체 구성을 나타내고있다.

퍼지 적응제어 시스템은 제어 설계 파라미터의 조절을 담당하는 퍼지 조절 알고리즘 부와 조절된 파라미터를 이용하여 파라미터 추정(estimation) 및 적

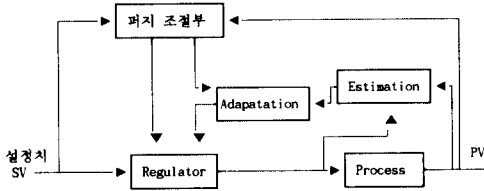


그림 1 퍼지 적응제어 시스템의 구성  
Fig. 1. Configuration of fuzzy adaptive control system.

응(adaptation) 제어에 의한 실제적 제어를 담당하는 수치형 적응제어부로 구성된다. 퍼지 조절부는 지식 베이스(knowledge base)부와 추론(inference)부로 나누어지는데 지식 베이스부는 제어대상과 제어기의 경험 데이터에 의한 정보들을 production 규칙에 의해 나타낸 정보를 저장하고 있으며 추론부에서는 결정된 퍼지 입력 변수에 대하여 지식베이스부의 규칙을 이용하여 정해진 추론법에 의하여 출력치를 결정하는 역할을 하고 있다. 이외에 기타 설계 파라미터를 저장하는 데이터 베이스부와 입,출력 변수들의 변형(fuzzification, defuzzification)을 담당하는 입,출력부의 보조 기능이 있다. 퍼지 변수는 제어부의 설계 요소를 이용하고 있다. 적응 제어부는 자기동조 제어에 의하여 실제적 제어 연산을 행하고 있다. 다음은 수치형 적응 제어기(numeric adaptive controller)의 기능을 살펴본다.

2. 수치형 적응제어기의 구성

제어 대상은 시간지연을 갖는 단일 입력 단일 출력(SISO)시스템으로 다음의 식(1)과 같이 가정한다.

$$y(s) = e^{-sT} \frac{B(s)}{A(s)} \mu(s) + \frac{C(s)}{A(s)} v(s) \tag{1}$$

T는 지연 시간이고 v(s)는 외란(disturbance)을 표시한다. 이산화 영역의 최소자승 예측기(least square predictor)에 해당하는 연속형 에뮬레이터(emulator) 보상기(φ(s))를 도입하여 공칭(nominal) 전체 폐 루우프 시스템을 구성하면 그림 2와 같다.

여기서 u(s)는 제어 출력이며 φ(s)는 에뮬레이터 출력이며 Q(s)는 제어 가중치 전달 함수를 나타낸다. 에뮬레이터중 다항식 P(s)는 플랜트 극점을 보상하고 Z(s)는 플랜트 영점을 보상하며, 지수 함수(e<sup>-Ts</sup>)는 시간지연 요소를 보상하기 위하여 도입되었다. 이상적인 에뮬레이터를 실제로 실현(realization)시키기 위

하여는 Z(s)를 실현 가능부(Z(s))와 실현 불가능부(Z'(s))의 곱으로 분리시키고 지수 함수는 Pade 방식에 의하여 간략화 시킴으로써 가능해진다. 이렇게 함으로 이상적인 에뮬레이터는 실현화된 에뮬레이터 출력(φ(s))을 얻을 수 있게 되며 e\*(s)는 실현화 될 수 없거나 간략화하는 과정에서 발생한 오차이다. [8]

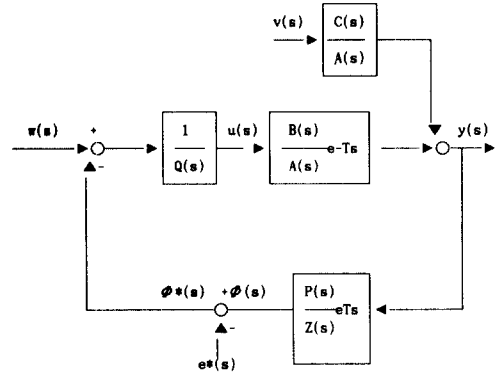


그림 2. 에뮬레이터를 이용한 제어 시스템도  
Fig. 2. Block diagram of the control system with emulator.

다음은 그림 2의 시스템 구성도로부터 제어기 u(s)를 구한다.

$$Q(s)u(s) = w(s) - \Phi^*(s) \tag{2}$$

Q(s)를 제어 가중치 전달 함수라고 하며 다음과 같이 정의한다.

$$Q(s) = \frac{Qn(s)}{Qd(s)} = \frac{qs}{Qd(s)} \tag{3}$$

여기서 제어 가중치 전달 함수 Q(s)의 분모항(Qd(s))과 분자항(Qn(s))의 설계 파라미터들은 시스템 강인성에 영향을 미친다. 이 논문에서는 설계 파라미터로 분자항의 파라미터 q를 택한다.

위에서 구성된 제어기는 제어 대상 파라미터를 알고 있다고 가정하였으나 적응제어기를 구성하기 위하여 파라미터 추정자를 도입해야 한다. 이 논문에서는 최소자승 추정자(least squares estimator)를 채택하여 에뮬레이터의 파라미터를 직접 추정하는 직접형(direct 혹은 implicit)적응제어기를 구성한다. 직접형 적응제어기에 있어서 에뮬레이터의 파라미터 벡터를 θ라 하고 데이터 벡터를 X(t)라고 하면 최소자승 반복형(recursive) 추정자는 식 (4)와 같다.

$$\frac{d\hat{\theta}(t)}{dt} = S^{-1}(t)X(t)\hat{e}(t) \tag{4}$$

$$\frac{dS^{-1}(t)}{dt} = -\beta S^{-1}(t)X(t)X^T(t)S^{-1}(t)$$

여기서  $\hat{e}$ 는 추정오차,  $\beta$ 는 망각 인자(forgetting factor),  $0 < \beta < 1$ 이고  $S(t)$ 는 최소자승 최소화 평가지수의  $\theta$ 에 관한 2차 미분형의 상호분산(covariance) 함수이며 양의한정(positive definite) 행렬이다.

이상과 같은 직접형 적응제어기를 구성할 경우는 비모델화 성분을 고려하지 않았으나 실제 시스템에서는 여러 비모델화 성분이 존재한다. 여기서는 이 비모델화 성분을 이상적인 직접형 적응제어기에서 계산된 제어출력과 실제 시스템 입력간에 존재하는 비모델화 성분(unmodelled dynamics,  $N(s)$ )으로 가정하며 비모델화 성분을 고려한 적응제어 시스템의 오차모델로부터 강인성에 대한 영향을 분석할 수 있다.<sup>[7]</sup> 즉, 비모델화 성분을 포함한 오차모델 시스템이 안정 조건을 만족할때 적응제어 시스템은 강인하게되며 강인성을 만족하는 조건은 다음과 같이 요약할 수 있다.

조건 1) 비모델화 성분  $N(s)$ 는 안정하다.

$$N(s) = \frac{BN(s)}{AN(s)} \tag{5}$$

조건 2) 오차모델 구성시 발생한 다음의 전달함수  $G(s)$ 는 안정하다.

$$G(s) = \frac{L(s)}{1 + L(s)N(s)} \tag{6}$$

조건 3)  $M(s)$ 의 이득이 1보다 작다.

$M(s)$ 는  $N(s)$ 를 고려한 오차 모델 구성시 유도된 전달 함수이며  $G(s)$ 에 포함되고 있다. 식 (7)과 같고  $L(s)$ 는 그림 2에서의 루프 이득을 나타낸다.

$$M(s) = \frac{Z^{-1}(s)E(s)A(s)}{P(s)C(s)} \frac{N^{-1}(s) - 1}{1 + L^{-1}(s)N(s)} \tag{7}$$

식 (7)과 아래의 식(8)은  $q$ 값에 의하여 강인성 특성이 결정된다.

$$L(s)N(s) = \frac{Qd(s)B(s)P(s)BN(s)}{q_s A(s)Z(s)AN(s)} \tag{8}$$

위의 조건을 이용하여 서로 다른  $q$ 에 대한 응답 특성을 예시할 수 있다. 모델링 시스템이 식 (9)와 같은 시간지연을 갖는 1차 지연시스템이고 비모델화 성분이 2차 시스템이라고 가정하였을때  $q$ 에 대한 강인성은 다음과 같이 보일 수 있다.

$$\frac{B(s)}{A(s)} = \frac{1}{10s + 1} e^{-s} \tag{9}$$

$$N(s) = \frac{100}{s^2 + 8s + 100}$$

그림 3은  $M(s)$ 의 주파수 특성 곡선이며 각각에 대한 응답 특성은 그림 4와 같다.

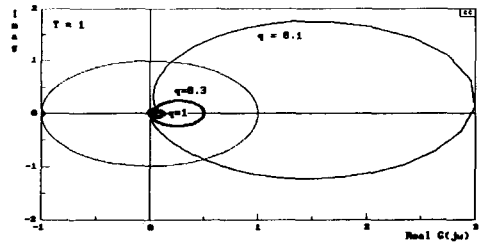


그림 3. Nyquist 특성도  
Fig. 3. Nyquist Diagram.

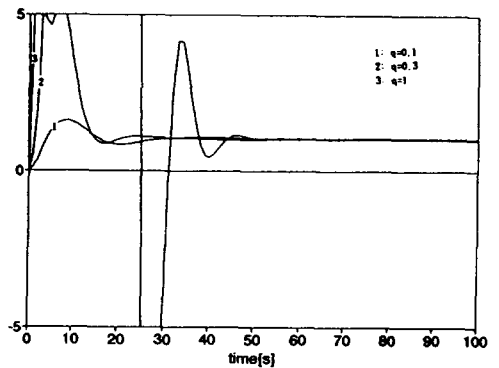


그림 4. 응답 곡선  
Fig. 4. Response curve.

서로 다른  $q$ 에 의한 주파수 특성 곡선(Nyquist plot)은  $N(s)$ 에 대한 강인한 특성을 보이며 설계한 적응제어기는 제어 가중치  $q$ 에 따라 응답 특성이 다르게 나타나고 있다. 즉, 제어가중치  $q$ 가 클 수록 Nyquist 선도가 1보다 작게되며 강인성 안정조건에 따라 비모델화 성분에 대한 강인성이 좋은 경향을 보이고 있으며  $q$ 가 적을 경우에는 비모델화 성분에 대한 특성은 좋지 않지만 초기 상태에서의 빠른 응답 특성을 보인다. 이 논문에서는 이러한 특성을 이용하여 제어 가중치 설계 파라미터 제어 요소를 on-line 상에서 퍼지 규칙에 의하여 조절할 수 있도록 하였다. 다음은 구체적 퍼지 규칙 구성 방법에 대하여 살펴보자.

Ⅲ. 퍼지 규칙의 적용

설계된 수치형 적응제어기를 실 공정에 효과적으로 적용 하기에는 어려운 점이 많다. 특히 제어대상이 온도 공정한 경우에는 목표치의 변화가 많아 서로 다른 동작점에서의 강한 비 선형 특성과 비모델화 성분으로 인하여 원하는 목표치마다 동일하게 좋은 성능의 제어효과를 얻기가 어렵다. 따라서 실 시간 운영 시에는 지속적으로 설계 파라미터를 변화 시켜줄 수 있도록 하는 것이 필요하다.

이 논문에서의 공정 시스템의 제어목적은 출력치 (set value)를 일정한 목표치(설정치)로 유지시키는 것이며, 퍼지 규칙에 의하여 결정되어야 하는 적응제어의 설계 파라미터는 다음과 같다.

- ① 비모델화 성분에 대한 강인성 특징을 갖는 제어 가중치(q).
- ② 최대 제어 출력(umax).

위의 설계 파라미터를 위한 퍼지 규칙의 구성은 다 입력, 다출력 관계에 의하여 이루어지지만 독립된 관계의 분리된 규칙에 의하여도 구성할 수 있다. ①, ②의 설계 파라미터에 대한 경험적 정보를 이용하여 퍼지 규칙을 구성할 수 있다. 즉, ①항에 대하여는 앞장에서의 알고리즘에 의한 강인성을 고려한 q에 대한 경험치로부터, ②항에 대하여는 ON-OFF 제어에 의하여 얻어진 데이터로부터 퍼지 규칙을 구성 한다.

퍼지 규칙을 구성하기 위하여 시스템 상태의 신호들과 위의 설계 파라미터를 퍼지 변수화 할 필요가 있으며 이를 위한 퍼지 입,출력 변수를 표 1과 같이 선택한다. 입력 퍼지 변수(Xi)에 해당하는 신호들으로써 E는 설정치와 출력치의 오차(error), E는 오차율(error rate), W는 설정치에 관한 퍼지 변수이고, 출력 퍼지 변수(Y)로써 Q는 제어 가중치(q), Umax는 최대 제어 출력(umax)의 퍼지 변수들을 나타낸다. 여기서 Q와 Umax는 입력 퍼지 신호가 서로 다르기 때문에 서로 독립적이라고 가정한다.

표 1. 퍼지 입,출력 변수  
Table. 1. Fuzzy input, output variables.

	q 결정	umax 결정
입력 변수(Xi)	E(=X1) ΔE(=X2)	W(=X1)
출력 변수 (Y)	Q	Umax

각 변수의 소속함수(membership functin, μ)는 삼각형 형태이며 식 (10)은 퍼지 입력 변수 Xi의 삼각형 형태를 나타내고 있다.

$$\mu_{xi} = \begin{cases} \frac{1}{b}(-|x_i - a| + b) & \text{for } a - b < X_i < a + b \\ 0 & \text{for elsewhere} \end{cases} \quad (10)$$

여기서 a는 소속함수의 중심, b는 폭을 나타낸다. 전진부, 후진부 퍼지 변수의 라벨을 A, B라고 하면 규칙을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} R1: & \text{if } X_1 \text{ is } A_{11} \text{ and } X_2 \text{ is } A_{12} \text{ then } Y \text{ is } B_1 \\ R2: & \text{if } X_1 \text{ is } A_{21} \text{ and } X_2 \text{ is } A_{22} \text{ then } Y \text{ is } B_2 \end{aligned} \quad (11)$$

$$Rn: \text{if } X_1 \text{ is } A_{n1} \text{ and } X_2 \text{ is } A_{n2} \text{ then } Y \text{ is } B_n$$

각 규칙은 다음과 같이 정의 되는 퍼지 implication 관계(Ri)에 의하여 실현 될 수 있다.

$$\begin{aligned} \mu_{Ri} &= \mu(A_{i1} \text{ and } A_{i2}) \cdot \mu(B_i)(X_1, X_2, Y) \\ &= [\mu_{A_{i1}}(X_1) \text{ and } \mu_{A_{i2}}(X_2)] \cdot \mu_{B_i}(Y) \end{aligned} \quad (12)$$

전체 규칙에 대한 퍼지 추론(inference)은 Sup-star composition 방법에 의하여 이루어지며, star operator는 minimum operator(∧)를 이용한다. 추론 결과의 형태는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mu_B(z) &= \mu_{B10} \vee \mu_{B20} \cdots \vee \mu_{Bn0} \\ &= [\alpha_1 \wedge \mu_{B1}(Y)] \vee [\alpha_2 \wedge \mu_{B2}(Y)] \cdots [\alpha_n \wedge \mu_{Bn}(Y)] \end{aligned} \quad (13)$$

여기서,  $\alpha_i = \mu_{A_{i1}}(X_{i0}) \wedge \mu_{A_{i2}}(X_{i0})$  이고 적합도라고 한다.

추론의 결과데이터(y0)는 여러 비퍼지화 방식에 의해 얻을 수 있다. 식 (14)는 이산화 무게 중심법이다.

$$y_0 = \frac{\sum_{i=1}^p \mu_B(Y_{is}) \cdot Y_{is}}{\sum_{i=1}^p \mu_B(Y_{is})} \quad (14)$$

여기서, p는 support 수이고, Yis는 양자화된 각 출력 레벨의 support값이다. μ(Yis)는 이에대한 소속함수 값이다. 또한 후진부 퍼지 변수를 실수 값으로 하고 그 값을 yi라고 하면 식 (15)와 같이 간략화된 추론 결과를 얻을 수 있다.

$$y_i = \frac{\sum_{i=1}^n a_i \cdot y_i}{\sum_{i=1}^n a_i} \quad (15)$$

상기의 퍼지 추론부를 이루고 있는 소속함수를 off-line 에서 자동으로 결정하는 방법을 제시한다. 적응제어기의 특성으로부터 얻어진 데이터는 기준치 학습 데이터를 제공한다. 학습 데이터 집합 R은 식 (16)과 같다.

$$R = \{(X_h^i, Y_k^i) : k = 1, 2, \dots, h, i = 1, 2, \dots, m\} \quad (16)$$

여기서 X는 기준 입력, Y는 기준 출력, h는 데이터 요소(element)수, m은 입력 데이터 수를 나타낸다. 기준 학습 데이터와 식 (14)의 추론 데이터(Y)와의 차를 e라고 하자.

$$\begin{aligned} e &= Y_k - Y_k^i \\ Y &= f(a_{ij}, b_{ij}, y_i) \end{aligned} \quad (17)$$

여기서 a, b는 전진부 퍼지 라벨 소속함수의 중심과 폭, y는 후진부 출력 실수치를 나타낸다. 이를 이용하여 최적화를 위한 평가 함수를 식(18)과 같이 정의 할 수 있다.

$$H = \frac{1}{2} e^2 \quad (18)$$

평가 함수 H를 최소화 하는 각 규칙의 요소 a, b, y를 구함으로써 자동 학습 규칙을 구할 수 있다. 이 논문에서는 최소화 방법으로 gradient 방법을 채택하였다. 식 (15) - (18)로부터 평가함수에 대한 각 요소의 편 미분을 행한 k번째 데이터의 gradient 벡터는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial H}{\partial a_{ij}} &= \frac{\alpha_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i} e (y_i - Y) \operatorname{sgn}(x_j - a_{ij}) \frac{1}{b_{ij} \cdot A_{ij}(X_j)} \\ \frac{\partial H}{\partial b_{ij}} &= \frac{\alpha_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i} e (y_i - Y) \frac{A_{ij}(X_j)}{A_{ij}(X_j)} \frac{1}{2b_{ij}} \\ \frac{\partial H}{\partial y_{ij}} &= \frac{\alpha_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i} e \end{aligned} \quad (19)$$

여기서 sgn 함수는 다음과 같이 정의한다.

$$\operatorname{sgn}(z) = \begin{cases} -1 & \text{for } z < 0 \\ 0 & \text{for } z = 0 \\ 1 & \text{for } z > 0 \end{cases} \quad (20)$$

각 요소의 반복 갱신(recursive update)은 식 (19)로부터 gradient 방법에 의하여 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} a_{ij}(k+1) &= a_{ij}(k) - La \frac{\partial H}{\partial a_{ij}} \\ b_{ij}(k+1) &= b_{ij}(k) - Lb \frac{\partial H}{\partial b_{ij}} \\ y_{ij}(k+1) &= y_{ij}(k) - Ly \frac{\partial H}{\partial y_{ij}} \end{aligned} \quad (21)$$

La, Lb, Ly는 학습 계수이며, 기준 데이터를 이용하여 각 규칙을 자기동조(self tuning) 학습 시킬 수 있다.

#### IV. 사례 연구

본 사례 연구에서는 제안한 알고리즘의 공정 제어 시스템의 적용을 위하여 알고리즘의 강인성을 파악한다. 이를 위해 먼저 시스템 모델을 가정한 후 비모델화 성분에 대한 강인성을 시뮬레이션에 의하여 분석한다. 비모델화 성분은 비모델 극, 영점 배치 요소(unmodelled pole-zero placement element)와 비모델 시간 지연요소(unmodelled time delay element)로 가정한다. 비모델화 성분에 대하여 수치형 적응제어기의 연속형, 이산형, 혼합형 제어기의 응답 특성을 조사한후 제안한 퍼지 적응제어기의 성능 결과를 비교한다.

##### 1. 시스템 모델링 및 제어기 실현

수치형 적응제어기의 각 형태의 비교와 설계 파라미터의 범위의 용이한 설정을 위하여 지연 시간을 갖는 공정의 모델식을 식 (22)와 같이 가정하고 비모델화 성분은 식 (23), (24)와 같이 가정한다. 전달 함수 NPZ1(s), NPZ2(s)은 비모델화 극, 영점 요소를 나타내고 있으며 전달함수 ND1(s), ND1(s)는 비모델화 시간지연 요소를 나타내고 있다.

$$\frac{y(s)}{u(s)} = \frac{5}{50s + 1} e^{-2s} \quad (22)$$

$$NPZ1(s) = \frac{30}{s^2 + 10s + 30} \quad (23)$$

$$NPZ2(s) = \frac{0.01}{s^2 + 0.02s + 0.01} \quad (24)$$

$$ND1(s) = e^{-2s}, \quad ND2(s) = e^{-5s}$$

비모델화 극, 영점 요소에 대한 강인성을 파악하기 위하여 비 모델화 극점(pole)을 dominant 부분과 non-dominant 부분으로 구분하였으며, 비모델화 시간지연 요소에 대하여는 공칭(nominal) 시간지연 요소 보다 클 경우에 대하여 응답 특성을 조사하였다.

제어기 구성은 3종류의 연속형, 이산형, 혼합형 제어기를 구성하였다. 연속형 제어기(continuous controller)는 연속형 제어 대상에 대하여 연속형의 제어기를 구성함으로써 실제 제어 대상의 특징만을 직접 고려하여 설계할 수 있어 제어기 특성을 용이하게 알 수 있지만 디지털 컴퓨터 상에서 제어기를 직접 실현 할 수는 없다. 한편 이산형 제어기는 이산형 제어 대상을 고려한 이산형의 제어기를 설계함으로써 컴퓨터 상에서 쉽게 실현 할 수 있지만 이산화 된 제어 대상에 대한 보상 방법이 제어기 설계시 요구 된다. 이러한 문제점을 해결하며 디지털 컴퓨터 상의 이산형 제어기(digital controller)로 실현시키기 위하여는 설계된 연속형 제어기를 이산형으로 변환하면 실제 적용이 가능하게 된다. 이러한 형태의 제어기를 혼합형 제어기(hybrid controller)라고 한다. 혼합형 제어기는 비최소 위상 문제등 이산영역에서 제어기를 설계 했을 때의 여러 문제점을 해결 할수있는 방법을 제시하고 있다. 혼합형은 외적으로 이산형 제어기의 형태를 취하지만 제어기의 설계 대상은 연속형을 고려하고 있기 때문이다. 본 시뮬레이션 연구에서는 이산화 변환을 위해 안정 영역의 변환 특성이 좋은 Bilinear 변환 방법을 채택 하였다.

그림 5, 그림 6, 그림 7은 3 종류의 제어기에 대하여 비모델화 성분에 대한 응답 특성을 나타내고 있다.

각 그림의 제어기에서 설계 파라 미터 q는 50을 고정시켜 선택하였다. 이는 q가 작을 수록 앞에서 예시 하였던 것처럼 초기 응답이 빠르지만 제어기가 강인하지 못한 사실과 3 종류의 제어기 비교를 분명히 하기 위함이다. 이산형 변환을 위한 샘플링 시간은 공정제어의 적용과 알고리즘의 연산 속도를 고려한 1초로 하였다. 그림으로부터 비모델화 성분에 대하여 3 종류의 제어기는 유사한 특성을 보이고 있다. 비모델화 극점이 dominant 영역에 가까울 수록 과도한 초기 응답과 불안한 정상 상태 응답을 보이고 있다. 비 모델화 지연 시간 요소의 경우에는 시간 요소가 클

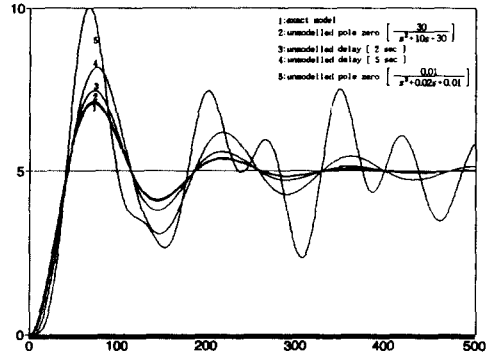


그림 5. 연속형 자기동조 제어기 응답  
Fig. 5. Response for continuous self tuning control.

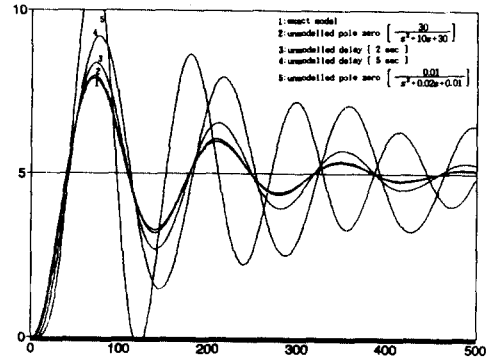


그림 6. 이산형 자기동조 제어기 응답  
Fig. 6. Response for discrete self tuning control.

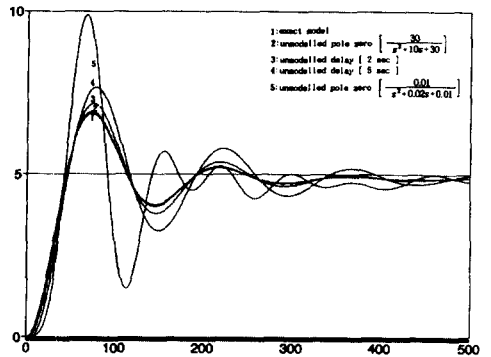


그림 7. 혼합형 자기동조 제어기 응답  
Fig. 7. Response for hybrid self tuning control.

수록 진동 폭이 크게 나타나고 있다. 3 종류의 제어 기증 이산형 제어기의 응답이 비모델화 성분이 클수록(비모델화 극점이 원점에 가깝고 비모델화 지연 시간 요소가 큰 경우) 가장 불안하게 나타나고 있으며 혼합형 제어기의 경우에는 비모델화 성분이 작을수록 연속형과 유사하지만 비모델화 성분이 큰 경우에도 3 종류의 제어기 중 가장 안정된 특성을 보이고 있다.

2. 퍼지 적응제어기의 적용

위의 강인성 특성 분석과 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 모의 실험으로부터 강인한 특성을 보여주는 q의 적정 범위 데이터를 얻을 수 있다. 본 모의 실험에서는 이 데이터를 이용하여 퍼지 추론을 할 수 있도록 지식 베이스를 구축하여 퍼지 추론에 의하여 on-line에서 설계 파라미터를 변화 시켜주는 제안한 퍼지 적응제어기의 특성을 조사하였다. 퍼지 추론을 구성하고 있는 규칙을 위한 전진부, 후진부 소속함수의 위치 결정은 먼저 q의 적정 범위 데이터를 고려하여 임의로 설정한 후에 소속함수의 위치 변화를 주고자 할 때 기준되는 q의 학습 데이터를 이용하여 본 논문에서 채택한 gradient 자기동조 알고리즘에 의해 전진부 소속함수의 중심과 폭, 후진부 출력 실수치를 미세 조정토록 한다. 추론을 위한 퍼지 규칙은 표2와 같다. 시스템 상태에 따라 퍼지 추론을 하여 설계 파라미터 q를 결정하는 퍼지 적응제어기의 성능 판단을 용이하게 하기 위하여 9개의 규칙만을 사용하여 앞의 강인성 분석과 q의 변화에 따른 시뮬레이션 결과를 표현 하였다. 실제 입력 값을 퍼지 변수화하기 위한 양자화(quantization) 방법은 삼각형 소속함수에 대한 선형식을 이용하여 구하였다.

표 2. 퍼지 규칙(q)  
Table 2. Fuzzy rules(q).

$\Delta E$	E	NE	ZR	PO
NE	SMALL	LARGE	MIDDLE	
ZR	MIDDLE	LARGE	LARGE	
PO	LARGE	LARGE	SMALL	

이에 대한 응답 특성은 그림 8과 같다.

그림으로부터 시스템의 상태에 따라 제어 설계 파라미터 q를 퍼지 규칙에 따라 변화 시킬 경우의 응답이 앞에서 보여준 고정된 경우의 응답들보다 빠른

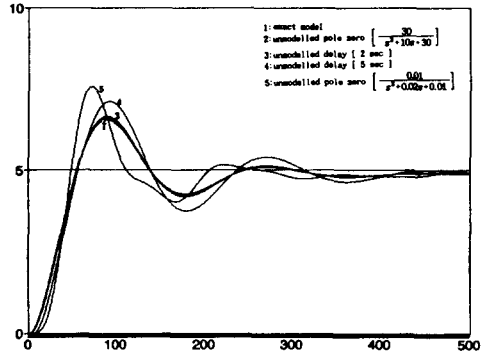


그림 8. 비모델화 성분에 대한 응답(퍼지 적응제어)  
Fig. 8. Response for variation of unmodelled dynamics.

초기 응답과 안정된 정상 상태 결과를 보여 주고 있다. 비모델화 성분이 크게 존재 해도시스템 응답은 강인한 특성을 보여주고 있다.

위의 예를 통한 사례 연구로부터 비모델화 성분이 있는 시스템의 제어에 있어서 시스템 특성에 따라 퍼지 규칙을 적용한 퍼지 적응제어기가 수치형 적응제어기의 고정된 설계 파라미터에 의한 제어기 보다 강인한 응답 특성을 보여 주고 있음을 알 수 있으며 실 공정제어에 효과적으로 적용 할 수 있는 가능성을 보였다.

V. 실험 및 고찰

공정제어 시스템의 대표적인 전기로 시스템에 제안한 퍼지 적응제어기를 적용, 실험하였다. 전기로는 비 선형성이 강하고 비모델화 성분이 큰 시스템이다. 그림 9는 전기로 제어 시스템을 나타낸다. 전기로 제어 시스템은 전기로, 센서부, PIO 부(programmable

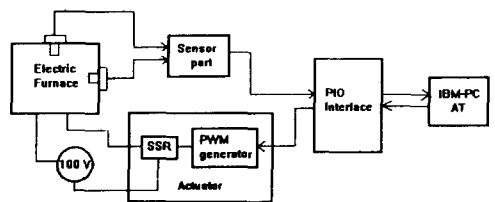


그림 9. 전기로 제어 시스템의 구성도  
Fig. 9. Configuration diagram for electric furnace control system.



i/o interface board), 액츄에이터(actuator), IBM-PC AT Micro Computer의 하드웨어와 컴퓨터 내의 제어 시스템 Monitor, MMI(man-machine interface), 제어 알고리즘, 프로세서 인터페이스의 소프트웨어로 구성하였다.

그림 10은 실시간 퍼지 적응제어기의 동작 흐름도를 나타내고있다.

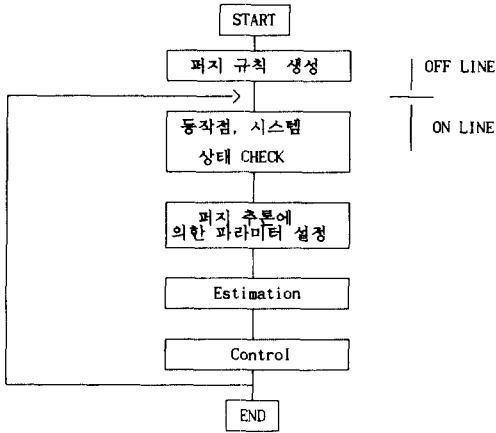


그림 10. 퍼지 적응제어기의 동작 순서도  
Fig. 10. The operation flow for fuzzy adapative controller.

여기서 시스템 상태와 동작점 변화에 따른 설계 파라미터( $q, u_{max}$ )의 조절은  $q$ 의 경우 출력 오차와 오차율의 상태에 따른 표 2와 같은 규칙을 사용하였고  $u_{max}$ 의 경우에는 기준 온도 동작점에 따른 표 3과 같은 규칙을 사용하였다. 표 3에서 전진부, 후진부의 퍼지 라벨명은 같은데 이는 실험치에 의한  $u_{max}$ 의 결정 특성때문이며 동작점 특성에 따라 전진부, 후진부의 중심치와 폭은 서로 다르게 된다.

표 3. 퍼지 규칙( $u_{max}$ )  
Table. 3. Fuzzy rules( $u_{max}$ ).

기준 온도(W)	SMALL	MIDDLE	LARGE
$U_{max}$	SMALL	MIDDLE	LARGE

상기와같이 구축된 전기로 제어 시스템을 이용하여 퍼지 적응제어기의 실 시간 적용하였다. 실험 목적은 로내의 평균 온도를 원하는 온도로 유지시키는 것이다. 샘플링 주기는 일반 온도 공정제어에서 사용하는 범위의 10초로 하였다. 데이터 수집시 온도 측정치는

센서 오차를 줄이기 위해 20개의 입력을 받아 sorting한후 최대,최소값 5개씩을 제외한 10개의 평균값을 취하여 결정하였다. 제어 설계 파라미터는 강인성을 고려한 계수 설정 방식과 동작점 부근에서의 릴레이 제한 제어에 의해 얻어진 릴레이 자동 조절 규칙을 기준으로 하여 얻을 수 있었다. 시간지연은 50초로 가정하였다. 그림 11은 전기로 특성을 파악하기 위한 릴레이 제어를 표시한다. 동작점 부근에서 릴레이를 ON, OFF시켰을때 초기 예열 상태와 주위 온도 및 시간지연 요소등에 의하여 온도 상승부와 하강부에서 제어 입력에 따라 큰 비 선형성을 보여주고 있다. 제어기 적용 특성을 파악하기 위하여 실험은 설정치 변화에 따른 온도 특성 조사 방식을 택하여, 기준 입력을 70°C로하여 6000초 동안의 응답을 얻은 후 다음 6000초 동안 기준 입력을 100°C로 하여 응답을 살펴 보았다. 그림 12는 릴레이 조절 방식에 의하여 얻어진 계수를 이용하여 PI제어를 행한 결과이다. PI제어의 경우 초기 상태에서 오버슈트가 존재하며 기준 입력 5%내의 정상 상태에 이르기까지 약 4000초가 걸린다. 그림 13은 고정된 파라미터의 자기동조 제어기의 적용 결과이다. 자기동조 제어기의 경우는 오버슈트가 없으며 정상 상태에 이르기까지 3000초가 걸리고 있는 특성을 보여주고 있으며 100°C 설정치 변화에 대하여도 PI 제어 보다 빠른 반응을 보이고 있다.

그림 14는 퍼지 규칙에 의하여 설계 파라미터를 변화 할 경우의 응답이며, 초기에 오버 슈트가 존재 하지만 2000초의 정정 시간을 보여 주고 있으며 정상 상태의 오차율도 zero에 이르고 있음을 알 수 있다.

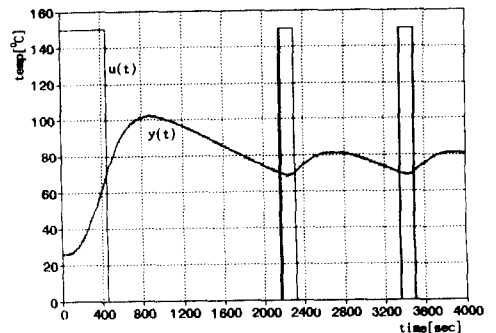


그림 11. Relay 제어  
Fig. 11. Relay Control.

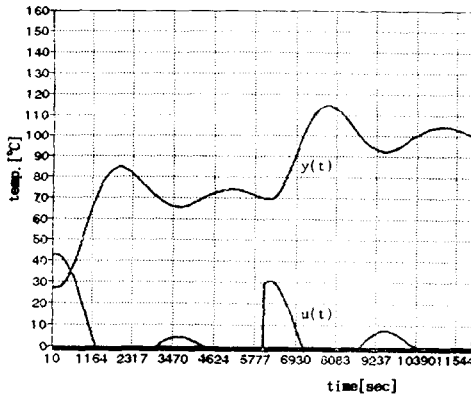


그림 12. PI 제어  
Fig. 12. PI Control.

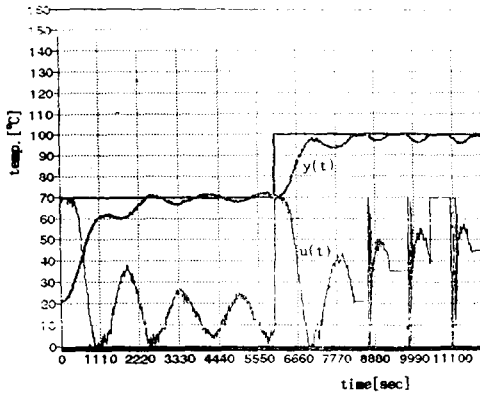


그림 13. Self Tuning 제어  
Fig. 13. Self Tuning Control.

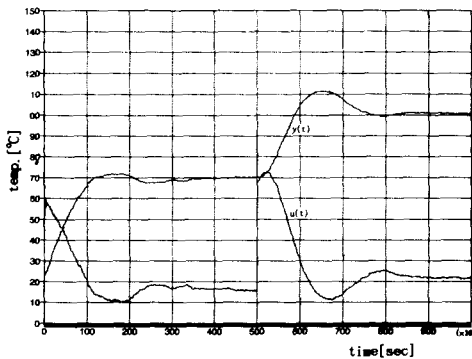


그림 14. 퍼지 적응제어  
Fig. 14. Fuzzy Adaptive Control.

## VI. 결론

여러 분야에 적용되어온 퍼지 이론은 비선형성이 강하고 모델링이 어려운 제어계에 적용하여 그 효과를 인정받고 있으며 공정제어 분야에서도 고 기능 제어 영역에서 그 필요성이 가속화 되고 있다. 이 논문에서는 실제로 적용 하기에 어려운 적응제어기를 효과적으로 제어할 수 있도록 하는 새로운 형태의 퍼지 적응제어기를 제안하였다. 퍼지 적응제어기는 수치형 자기동조 제어부와 퍼지 추론부로 구성되었으며 모의 실험을 통하여 알고리즘의 강인성을 조사하고 공정제어 시스템의 대표적 예인 전기로 시스템에 적용하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 모의 실험을 통해 퍼지 적응제어기는 고정 설계 파라미터 방식의 선형제어기 보다 강인한 특성을 보여 주고 있음을 알았다. 또한 초기 상태에 오버슈트가 존재하는데 이는 실험시 선택된 제어 가중치 전달 함수(Q(s))에 관계되며 Q(s)의 조절 파라미터와 퍼지 규칙을 확장시켜 조절하면 해결될 수 있다고 판단된다.

2) 퍼지 적응제어기의 전기로 적용을 통해 기존의 PI 제어기나 자기동조 제어기보다 빠른 초기 응답과 안정된 정상 상태를 보여 주고 있어 이로부터 적절한 퍼지 규칙을 사용할 경우에 기존 제어기의 최적 설계 파라미터에 의한 제어가 가능함을 보였다.

3) 고정 설계된 파라미터 적응제어기의 연속형, 이산형, 혼합형 방식의 특징을 살펴 보았다. 제어 대상의 기본적 가정(연속형, 이산형)에 따라 응답 특성이 차이가 있음을 알 수 있었고 이는 변환 과정에서 생긴 오차에 의한 결과로 판단되며 연속형 제어 대상 설계에 의한 실제 적용에 대한 연구가 더 필요하다.

4) 제안한 퍼지 적응제어기는 공정 상태에 따라 수치형제어기의 설계 파라미터 운영을 효과적으로 할 수 있는 방법을 보였다. 즉, 제어기 설계자의 분석 데이터와 제어기 운영자의 경험을 공정 상태의 필요에 따라 퍼지 규칙을 조절 함으로써 유용하게 변화시킬 수 있다.

5) 분산형 산업 공정제어를 위한 고 기능 제어 기법으로의 적용 가능성을 보였으며, 실제 적용을 위하여 관리, 감시 부문에서는 효과적인 운전자의 대화 방식과 제어 부문에서는 실 시간 제어 및 실 시간 조절의 효과적 방법 및 TASK 관리 및 제어 알고리즘 상호간의 인터 페이스 문제에 대한 연구가 더 필요하다.

## 參考文獻

- [1] Lee C.C., "Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller, part ", *IEEE Trans. Systems, Man, And Cybernetics*, vol.20, no.2, 1990.
- [2] Astrom K.J. and Wittenmark B., *Computer controlled systems*, Prentice Hall, pp.180-183, 1984.
- [3] Omatu, S. et al., "Adaptive control of furnace temperature by using a micro-computer," *IECON '91*, pp.1979-1984, 1991.
- [4] Astrom K.J. and Wittenmark B., *Adaptive Control*, Addison Wesley, 1989.
- [5] Goodwin G.C. and Sin K.S., "Adaptive control of non-minimum phase systems," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol.26, no.2, 1981.
- [6] Clarke D.W and Gawthrop P.J., "Self tuning control," *Proc. IEE*, vol.126, no.6, pp.633-640, 1979.
- [7] Gawthrop P.J., "A continuous-time self-tuning control", vol.1, Research studies press, 1987.
- [8] 명 노직, 강 민구, 허 옥열, "전기로의 퍼지 제어에 관한 연구", *대한전기학회논문지* 40권 12호, pp.1262-1268, 1991.
- [9] 문 석우 외 4인, "퍼지 규칙을 이용한 전기로 온도 제어", *한국자동제어학술회의*, pp.872-877, 1991.10.
- [10] 주 영훈 외 5인, "자율 이동 로봇의 퍼지 제어기의 연구," *대한전기학회논문지* 41권 9호, pp.1071-1083, 1992.
- [11] Nomura 외 2인, "델타 룰에 의한 퍼지 추론의 자동 tuning 수법과 장애물 회피에의 응용", *일본 fuzzy 학회지* vol.4, no.2, pp.379-386, 1992.
- [12] Bryson A.E. and Ho Y.C., "Applied optimal control", Ginn, 1969.
- [13] Lee B.K. and Huh U.Y., "Robust self tuning controller for electric furnace", *Proc. IEEE ISIE*, vol.1, pp.121-125, 1992
- [14] Tzafestas S. and Papanikolopoulos N. P., "Incremental fuzzy expert PID control", *IEEE Trans. Industrial Electronics* vol.37, no.5, 1990.
- [15] 이 봉국, 허 옥열, "전기로를 위한 자기동조 제어기의 설계", *대한전기학회논문지* 42권 2호, 1993.

## 著者紹介



李鳳國(正會員)

1959年 8月 26日生. 1983年 2月 인하대 공대 전기공학과 졸업(공학사). 1986年 2月 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 현재 현재 금성산전(주)연구소 선임 연구원.



許旭烈(正會員)

1951年 12月 13日生. 1974年 2月 서울대 공대 전기공학과 졸업(공학사). 1982年 2月 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1984年 ~ 1986年 미국 일리노이대 전기과 방문교수. 1980年 ~ 현재 인하대 공대 전기과 교수 과학재단 제어 계측 신기술 연구 센터 참여교수. 전기학회 편집위원.