

전기로의 퍼지-신경회로망 제어기 설계

* 김진환, ** 허옥열, * 이봉국

* 인하대학교 공과대학 전기공학과
** 제어 계속 신기술 연구 센터

A Fuzzy-Neural Controller Design for Electric furnace

* Jin-Hwan Kim, ** Uk-Youl Huh, * Bong-Kuk Lee

* Dept. of Electrical Engineering Inha University
** ERC for advanced Control and Instrumentation

abstract

Fuzzy Theory has shown good control performance for non-linear system that is difficult to be controlled by the conventional controller. Backpropagation neural network can interpolate output without the priori knowledge of its dynamics. In this paper, we propose a Fuzzy-Neural Controller. The Fuzzy Control by deterministic Rule may not be sensitive for uncertain conditions and has a disadvantage of setting the rule by repeatedly experience. To solve such problems, we construct Self organizing Fuzzy-Neural Controller which can reorganize the fuzzy rule according to the state of System. Experimental results show that proposed Fuzzy-Neural Controller has better performance than conventional controller(PID) has especially rising time and overshoot characteristics.

은 라인 퍼지 제어기의 예로는 Performance 측정에 의한 parameter scaling[8]과 Fuzzy 변수의 parameter adjusting 방법[9]등이 있는데, 두 방법 모두 출력값의 조정에 목적이 있다. Off-line상의 퍼지제어시 미리 정한 퍼지규칙에 의해 추론의 결과를 얻을 수 있지만, 전기로와 같은 지연시간이 있는 시스템에 대해서는 예상하지 못한 규칙이 있을 수 있고, 미리 정한 규칙의 조건에 대한 출력이 올바르게 나올 수 없다. 결과적으로 전건부의 조건에 의해 후건부의 출력이 변할 수 있기때문에, 시스템의 응답 상태에 따라 후건부 변수의 조정으로 보다 적절한 제어를 얻을 수 있다. 이러한 후건부 변수의 조정을 신경 회로망을 이용하여 적절한 값으로 조정 시킬 수 있다. 이에 따라 본 논문에서는 전기로의 매 상태에 따라 후건부의 퍼지변수를 조정하여 전체 규칙들이 재 구성되는 퍼지-뉴럴 제어기를 설계하였다.

1. 서론

이미 널리 알려졌듯이 Fuzzy 이론은 1965년 캘리포니아 대학의 Zadeh 교수에 의해 제안되어 1974년 영국의 Mandami 교수에 의해 스미엔젠에 퍼지제어를 적용한 이후[1] 1970년대 중반부터 공학자들에 관심을모으며 1980년대에 이르러 실용화되기 시작되었다[2]. 이러한 퍼지 이론은 언어적인 표현에 의해 쉽게 규칙을 정할 수 있고, 수학적으로 확실히 기술할 수 없는 시스템 특성에 대해서도 규칙을 이용한 퍼지추론에 의해 적절한 추론값을 얻을 수 있기 때문에 비 선형 시스템에 대해서 응용되고 있다[3]. 신경 회로망 이론은 인간의 두뇌를 모델화 한 것으로 음성인식, 영상 인식, 로봇트 비전등 주로 인식을 필요로 하는 분야에 많이 응용되고 있다[4][5]. 일반적으로 제어분야에서는 Fuzzy이론을 도입한 제어가 많이 이루어지고 있고, Fuzzy제어기에서 추론을 위한 출력부를 선형 화식으로 유도하기 어려울 경우 신경 회로망 이론을 이용하기도 한다[6][7].

본 논문에서는 전기로를 제어하기 위한 퍼지-뉴럴 제어기를 구성하고자 하는데, 전기로는 주위의 온도와 예열정도에 따라 동작점이 항상 변하는 시스템이기 때문에 모델링이 어렵고, 제어하기 힘든 시스템중 하나이다. 이러한 전기로에 대해 비 선형 시스템에 적용할 수 있는 퍼지 이론과 신경 회로망 이론을 이용해서 적절한 제어를 하고자 한다. 기존의 비 선형 시스템에 대한 미리 정한 규칙에 의해 추론하는 퍼지제어기만 으로 비교적 잘 제어 할 수 있지만, 좀더 미세한 제어를 위해서 시스템의 매 상태에 따라 규칙의 조정을 할 수 있는 Self Organizing 구조의 제어가 필요하고, 규칙 조정을 위한 기준데이터를 이용한 신경회로망의 적용은 기준 데이터 이외의 상태에 대해서도 적절한 값으로 조정할 수 있다.

2. 자기구성 퍼지-뉴럴 제어기

Self Organizing Fuzzy-Neural Controller 구성은 그림 2-1과 같다. 전체적인 자기구성 퍼지-뉴럴 제어기 구성은 전기로(Plant)에 제어입력을 주는 퍼지제어기와 퍼지규칙을 조정하는 신경회로망으로 구성되어 있다.

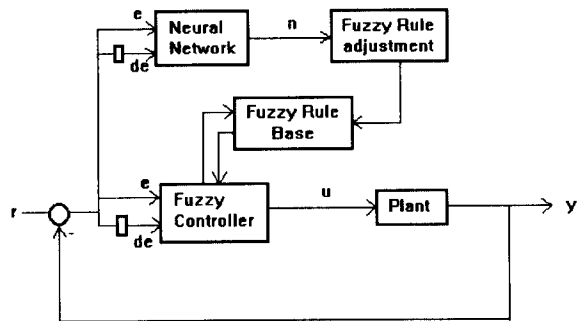


그림 2-1. Self Organizing Fuzzy-Neural Controller

2-1. 퍼지 제어기

퍼지 제어기는 언어적 표현이 가능하며, 이를 이용하여 쉽게 제어 규칙을 만들어 추론에 의해 제어하기 적합한 값을 만들어 낸다. 퍼지 규칙은 전건부와 후건부로 나누어지고, 각 규칙의 적합도는 퍼지합성에 의해 얻어지며, 합성법은 MIN-MAX 합성법과 MAX-PRODUCT 합성법을 사용할 수 있고, 이러한 합성법에 의한 적합도로 출력을 추론 할 수 있다.

퍼지 제어기는 다음과 같은 3가지로 나눌 수 있다.

1. Fuzzy Rule Base
2. 추론부
3. 비 퍼지화

Fuzzy Rule Base

퍼지 제어기는 규칙들을 추론한 결과로 제어 입력을 얻는데 규칙의 형식은 다음과 같은 퍼지 집합에 의해 이루어지고, 퍼지 규칙은 전건부 변수 2개, 후건부 변수 1개로 이루어진다

Ri : Te is A1 and dTe is A2, then u is B
 .
 .
 .
 Rn :

A1, A2 : 전건부 변수의 Fuzzy Set
 B : 후건부 변수의 Fuzzy Set

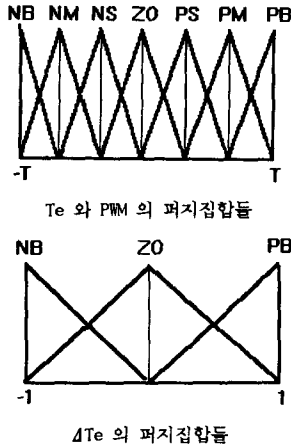
Te : 온도 오차값
 ΔTe : 온도 오차의 변화값 (crisp value)

퍼지변수로는 NB(Negative Big), NM(Negative Medium), NS(Negative Small), ZO(Zero), PS(Positive Small), PM(Positive Medium), PB(Positive Big)를 둔다.

퍼지규칙

Te ΔTe	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NB	ZO	PM
ZO	NB	NB	NB	NM	NS	PM	PB
PB	NB	NB	NB	NS	PS	PM	PB

제어규칙에 사용되는 퍼지 집합의 멤버십 함수 형태는 다음과 같다.



전건부변수는 e, Δe이고, 후건부변수는 PWM파형의 폭이고, 각 퍼지변수의 parameter는 다음과 같다.

	퍼지집합수	대역폭
Te	7	-T ~ T
ΔTe	3	-1 ~ 1
PWM	7	0 ~ 255

추론부

추론법은 일반적으로 추론법 1, 2, 3이 있는데 추론법 3의 경우 후건부의 출력을 선형화된 식으로 나타내어 퍼지분할에 의해 정량적인 결과를 얻을 수 있지만, 본 논문에서는 실험하는 전기로의 출력을 선형화된 식으로 표현하면 후건부의 퍼지변수를 조정할 때 선형화된 식이 맞지 않으므로 후건부 퍼지변수에 등급의 값에 의해 추론하는 추론법 1을 사용한다.

규칙에 의해 구해지는 전건부로부터의 적합도는 $W_i = \mu_i(Te) \wedge \mu_i(\Delta Te)$ 이고

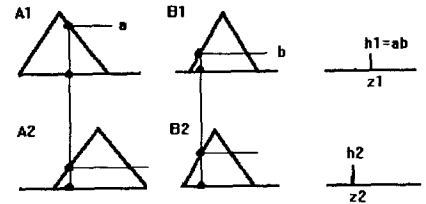
추론결과는

$B_i = W_i \wedge \mu(u)$ 에 의해 얻어지고,

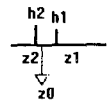
전체 규칙의 추론 결과는

$B = \sum B_i$ 에 의해 얻어진다.

추론된 값을 실제로 쓰기 위해서는 비퍼지화 해야한다. 추론법1의 추론 과정은 일반적으로 Product-sum-gravity method나 min-max gravity method 를 사용하지만 계산상의 단순화를 위해 Simplified fuzzy reasoning method[10]를 사용하였다.



Simplified fuzzy reasoning method



비 퍼지화

추론법 1의 비퍼지화 방법은 다음과 같은 무게중심법을 사용한다.

$$u_0 = \frac{\int B(u) \cdot u \, du}{\int B(u) \, du}$$

실제 제어기에서는 이산화 시킨것은 다음과 같다.

$$u_0 = \frac{\sum_i^n [\mu_i(u_i) \cdot W_i] \cdot u_i}{\sum_i^n [\mu_i(u_i) \cdot W_i]}$$

u_i : 후건부 퍼지 집합의 등급이 1이 되는 Normal point.

μ_i : 후건부 퍼지 집합의 등급

2-2. 신경 회로망

후건부 변수의 퍼지 집합을 변화시키기 위해 지도 입력과 출력을 pattern으로 하여 Backpropagation algorithm m을 사용하여 학습시킨다. 이 역전파 algorithm 은 지도 출력과 실제출력의 오차를 최소화 하면서 출력측에서 입력측으로 가중치를 조정해가면서 학습시킨다.

신경회로망 구조

가중치의 조정 algorithm 은 다음과 같다.

출력 layer의 가중치 조정

$$\Delta W_{pq,k}(n+1) = W_{pq,k}(n) + \Delta W_{pq,k}$$

$$\Delta W_{pq,k} = \eta \cdot \delta_{q,k} \cdot \text{Out}_{pj}$$

$$\delta_{q,k} = \text{Out}_{q,k} \cdot (1 - \text{Out}_{q,k}) \cdot (\text{Desired_Out} - \text{Out}_{q,k})$$

$W_{pq,k}(n)$: Hidden layer의 뉴런 p와 출력 layer k의 뉴런 q의 가중치

$\Delta W_{pq,k}$: $W_{pq,k}$ 의 변화량

Out_{pj} : layer j의 뉴런 p의 출력

η : 학습률, 0~1사이의 값

$\delta_{q,k}$: 출력 layer k의 error

Hidden layer의 가중치 조정

$$\Delta W_{op,j}(n+1) = W_{op,j}(n) + \Delta W_{op,j}$$

$$\Delta W_{op,j} = \eta \cdot \delta_{p,j} \cdot \text{Out}_{oi}$$

$$\delta_{p,j} = \text{Out}_{p,j} \cdot (1 - \text{Out}_{p,j}) \cdot \left(\sum_q \delta_{q,k} \cdot W_{pq,k} \right)$$

$\delta_{p,j}$: Hidden layer j의 error

신경회로망의 입출력 데이터

pattern data들은 0~1사이의 값으로 normalization 시키고, 학습후에 pattern data 입력이 아닌 입력에 대해서도 적절히 보간된 출력을 얻을 수 있다. 본 논문에서 사용한 pattern data는 입력데이터가 T_e 와 dT_e 이고, 출력데이터는 퍼지규칙의 후건부 퍼지 집합의 변화치가 된다. T_e 와 dT_e 의 pattern은 0~1 사이의 정규화 된 값을 사용하고, 출력 퍼지집합 변화치는 -3~3 사이의 값을 사용한다. 각 값의 의미는 다음과 같다.

- T_e : 0 : Maximum Overshoot
 0.5 : Steady state
 1 : Maximum Undershoot
- ΔT_e : 0 : 온도변화 상승 최대
 0.5 : 온도변화 없음
 1 : 온도변화 하강 최대
- ΔF_s : -n : 출력 퍼지집합 n 감소
 n : 출력 퍼지집합 n 증가

신경회로망의 지도 입출력은 표 5-1에 나타나 있다.

pattern 갯수는 45개이고, 학습률은 0.9이다. pattern의 입력중 ΔT_e 에 대한 값을 세분화하면 할 수록 정 정상상태에서의 미세한 온도변화에 대해서도 규칙의 출력 퍼지집합을 조정할 수 있다.

2-3. Rule 의 조정

T_e 와 ΔT_e 값에 의해 해당하는 규칙의 전건부를 찾은 후 신경회로망에 의해서 얻어진 퍼지 변수의 변화량에 의해 후건부 변수가 바뀐 새로운 규칙을 형성하게 된다.

규칙의 조정 순서도는 그림 5-1에 나타나 있다.

이와같은 규칙의 조정은 제어기의 초기 규칙의 전건부 변수의 추론에 의해 매 상태마다 전기기로 적절한 제어입력을 출력하기 위해 후건부의 퍼지변수를 재조정한다.

3. 전기로 제어 시스템

전기로의 제어시스템 구성은 6가지의 부분으로 나눌 수 있다. i) 전기로, ii) 센서부, iii) PIO Interface board, iv) Micro Computer, v) 액츄에이터, vi) 소프트웨어 제어기

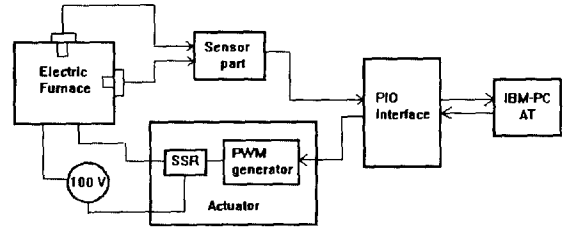
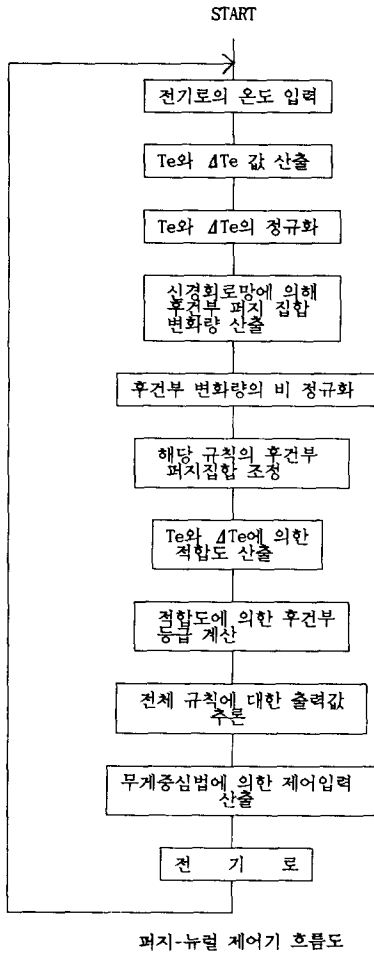


그림 3-1. 전기로 시스템 구성도

전기로의 발열은 전기로 노내 바닥에 있는 열선에 110V 전원을 인가함으로써 열을 발생시켜 일정 온도를 만들고, 냉각장치가 없기때문에 자연냉각 시킨다. 예열상태에 따라 특성이 변하므로 오펜시간동안 자연냉각이 필요하다. 전기로의 온도 측정을 위한 센서부는 전기로 내부에 있는 백금 축온저항체 (PT 100 Ω)의 0 $^{\circ}\text{C}$ ~500 $^{\circ}\text{C}$ 에 해당하는 저항값을 축온저항체 회로를 사용하여 측온 저항값을 전압값(0~5V)으로 바꾼다. PIO Interface board는 A/D, D/A Converter, DIO subsystem으로 구성되어 있고, 센서부에서 측정된 온도의 전압값을 디지털 값으로 변환하기 위한 A/D Converter와 전기로에 전원을 가하는 SSR을 구동하는 PWM회로에 디지털 값을 보내기 위해 DIO subsystem을 사용한다. A/D Converter를 통해 16.7 μs 의 변환시간을 거친 후 12bit의 값으로 PC에 입력된다. 실험에서 사용하는 컴퓨터로 Inter1-80286 CPU가 내장되고, 16-MHz의 clock speed를 갖는 IBM-AT를 사용하고, 컴파일러는 Borland C++ 3.0를 사용한다. 전기로에 전원을 인가하는 액츄에이터는 PIO Interface board에서 입력받은 제어입력(0~255)을 PWM(Pulse With Modulation)회로에 입력하여, 펄스폭 만큼 무접점 릴레이(SSR)를 ON 시킨다.

소프트웨어 제어기

전기로의 온도 측정은 A/D 변환기를 통해서 10초간의 Sampling 주기를 갖고, 센서오차를 줄이기 위해 20개의 입력을 받아, sorting 후 최대, 최소값 5개씩을 제외한 10개의 평균값으로 취한다. 아래 흐름도에서 알 수 있듯이 전기로의 퍼지-뉴럴제어 과정은 전기로의 온도를 측정한다. T_e 와 ΔT_e 의 값을 신경회로망에 입력하여 현재 상태의 규칙의 출력을 조정하도록 조정변화치를 출력한다. 이 조정변화치에 의해 해당 규칙의 출력퍼지변수가 바뀌고, 퍼지제어기의 추론에 의해 적절한 제어입력을 산출하여 전기로에 가한다.



4. 전기로 실험 결과

전기로는 예열정도에 따라 동작점이 변하고, 큰 지연시간을 갖는 시스템이다. 이러한 전기로의 특성을 볼 수 있도록 임의의 온도에서 온-오프 제어를 해보았다.

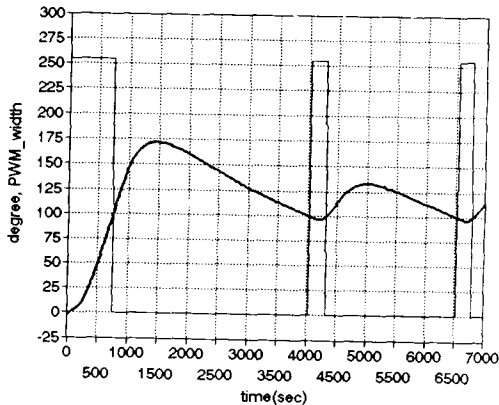


그림 4-1. 기준온도 100도에서의 ON-OFF제어

그림 4-1은 온도 100도를 기준으로 온-오프 제어를 한 것으로 100도 이하일때 PWM신호의 최대폭인 255를 제어입력으로 하고 100도 이하일때 최소폭인 0을 제어입력으로 취하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 온도가 100도까지의 상승시간이 넘어 설때 SSR을 오프 시켜도 170도 까지의 과도응답을 보이고, 자

연 냉각에 의해 기준온도 100도까지 도달하는 시간은 약 3500초의 시간이 걸림을 알 수 있고, 다시 100도 이하에서 SSR을 300초 동안 ON시키면, 135도까지 과도응답이 생기고, 2500초 동안의 자연냉각에 의해 100도를 하강한다. 100도에서 계속 SSR을 온-오프 시키면 실험시간이 7000초이후에도 4000초에서 6500초간의 온도특성이 반복된다. 이러한 실험에서 볼 수 있듯이 전기로의 특성은 많은 지연시간이 존재하고, 초기의 전원의 입력값의 정도와 전기로의 초기 제어시에 잠열에 따라 초기 과도응답 특성이 달라짐을 알 수 있다.

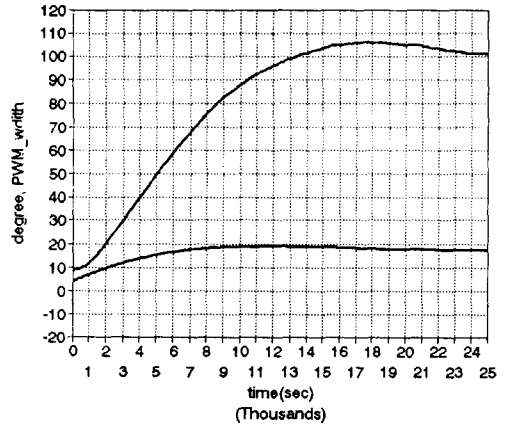


그림 4-2(a). 기준온도 100도에서의 PI제어
($K = 0.018, T_i = 1200$)

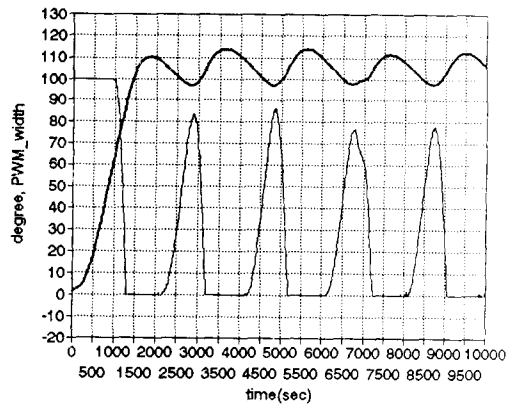


그림 4-2(b). 기준온도 100도에서의 PI제어
($K = 10, T_i = 400$)

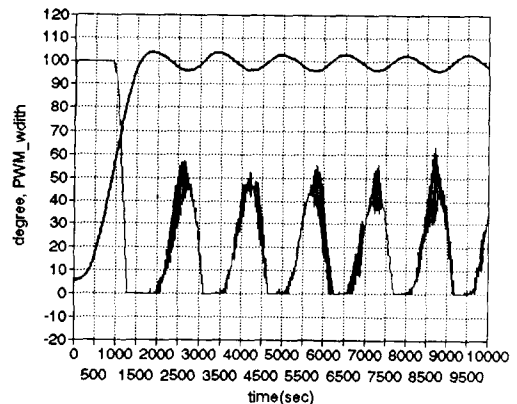


그림 4-2(c). 기준온도 100도에서의 PID제어
($K = 10, T_i = 400, T_d = 200$)

그림 4-2(a), (b), (c)는 일반적으로 많이 사용하는 PID 제어기로 제어한 결과인데, PID 제어기의 parameter값을 잘 설정함에 따라 응답이 개선될 수 있는데, 그림 4-2(a)는 그림 4-1의 On-Off 응답특성을 기준으로 Ziegler-Nichols의 tuning 방법에 의해 parameter $a=50$, $L=100$ 에 의해 구한 $K=0.018$, $T_i=300$ 을 가질때의 PI제어이다. 이때의 온도특성은 기준온도에 도달하는 상승시간이 매우 크며, 약 2%의 과도응답후 수렴한다. 그림 4-2(b)는 상승시간을 줄이기 위해 PI parameter로 $K=10$, $T_i=400$ 을 갖출때의 결과로 초기의 상승시간은 줄어들지만 온도응답은 10%의 과도특성과 3%의 Undershoot를 가지며 계속 진동함을 알 수 있다. 그림 4-2(c)는 $K=10$, $T_i=400$, $T_d=200$ 일때의 PID제어로 정상상태 오차는 4%로 PI제어보다 진동의 진폭이 줄어들음을 보인다.

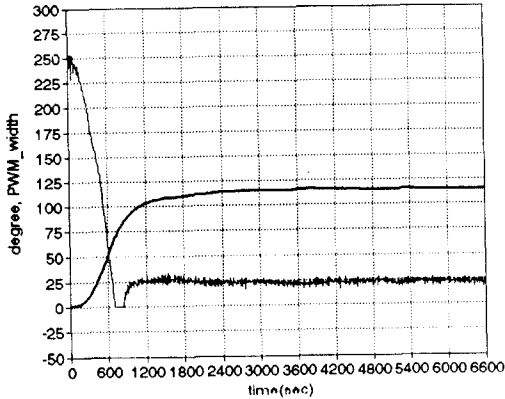


그림 4-3(a). 기준온도 100도 일때의 퍼지제어
(온도변화의 대역폭 -0.1~0.1)

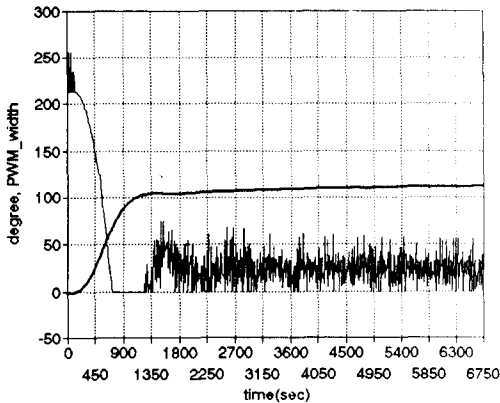


그림 4-3(b). 기준온도 100도 일때의 퍼지제어
(온도변화의 대역폭 -0.1~0.1)

그림 4-3(a), (b)는 퍼지제어기만으로 제어한 결과인데, 퍼지규칙에 따라 온도응답이 달라질 수 있으므로 경험적으로 규칙을 만들어야 한다. 그림 4-3의 적용한 퍼지제어기의 규칙은 진동이 일어나다 기준입력으로 도달하는 응답특성을 기준으로 구성하였다. 퍼지제어기의 규칙은 본 논문의 2-1의 후론부에 나타나 있다. 실험을 해보면, 온도오차 변화에 대한 퍼지집합의 대역폭이 작을 수록 제어가 잘 되는데, 이것은 전기기의 지연시간이 크기 때문에 온도변화의 미소한 차이도 일정시간후에 전기기의 온도상승을 일으킬 수 있다. 결국 이와 같은 것들 고려하여 경험적으로 퍼지규칙을 재조정 해야 한다. 이러한 온도변화의 폭을 달리하여 똑 같은 규칙에 적용해

본 결과는 그림 4-3(a), (b)에서 보듯이 다른 응답특성을 갖는다. 그림 4-3(a)는 온도응답이 초기에 비교적 좋은 특성을 나타내지만, 시간이 지남에 따라 온도가 조금씩 상승함을 알 수 있고, 그림 4-3(b)는 20도가 높은 120도로 제어되는 다른 응답특성을 알 수 있다.

본 논문에서 설계한 자기조정 퍼지-뉴럴 제어기는 초기에 설정한 규칙에 의해 제어되는 온도의 오차와 온도변화 오차로 출력 퍼지집합을 조정해준다. 그림 4-4(a), (b), (c)는 그림 4-3에 적용한 규칙을 퍼지-뉴럴 제어기에 적용한 결과이다. 신경회로망의 지도 입출력 값은 2-2에 나타나 있다. 신경회로망의 온도와 온도변화에 대한 지도입출력이 학습되어 있기때문에 지도입출력의 온도오차와 온도변화오차외의 값에 따라서도 적절하게 출력 퍼지집합을 조정할 수 있다. 이러한 조정에 의해 PID제어기를 적용할때보다 상승시간이 상당히 짧아지고, 정상상태에서의 진동도 생기지 않으며, 퍼지제어기에 비교해서 규칙이 올바르게 맞더라도 제어도중에 출력부의 퍼지집합을 조정하므로써 좋은 온도특성을 보여준다.

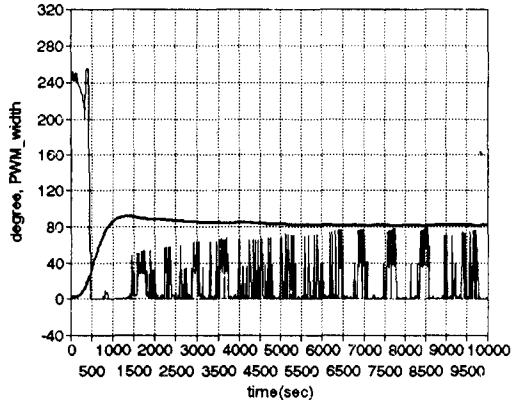


그림 4-4(a). 기준온도 80도 일때의 퍼지-뉴럴 제어

기준온도까지의 상승시간은 900초이고, 7000초에 수렴하게 된다. 초기에 제어입력값이 줄어들면 좀 더 나은 결과가 기대될 수 있다.

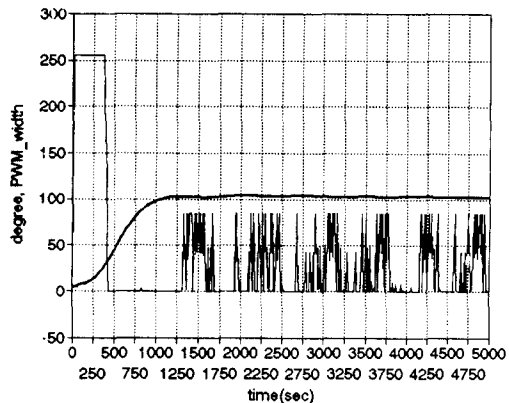


그림 4-4(b). 기준온도 100도 일때의 퍼지-뉴럴 제어

1000초의 상승시간을 가지며 약 1.5~2%의 온도오차를 가지지만, 좋은 응답이 나타난다.

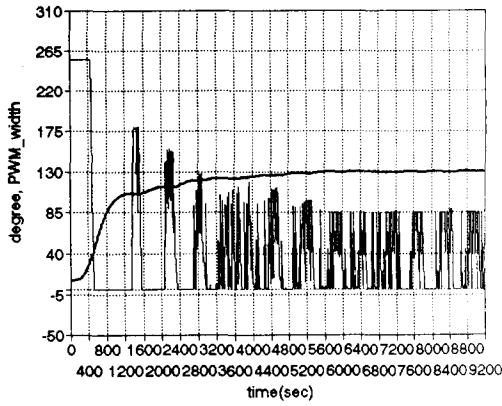


그림 4-4(c). 기준온도 130도 일때의 퍼지-뉴럴 제어

상승시간은 4800초지만, 정상상태에서의 온도오차는 거의 0%에 가깝다. 초기 제어입력값이 좀 더 크면 상승시간을 줄일 수 있다.

그림 4-3(a), (b), (c)의 온도응답에 보여지듯이 본 논문에서 설계한 퍼지-뉴럴 제어기는 초기에 제어입력 조정이 좀 더 보강되어야 하지만, PID제어기와 비교해보면 Ziegler-Nichlos 방법에 대해서는 상승시간의 대폭적인 향상을 피할 수 있고, 상승시간을 줄여본 PID제어에 대해서는 정상상태 오차가 대폭 개선되고, 퍼지제어기와의 비교해서는 퍼지규칙의 부족함이 있더라도 정상상태 오차가 적어짐을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서 구현한 on-line상의 제어는 신경회로망의 지도 값을 학습시킨 후에 퍼지 규칙만을 조정했지만, 130도의 온도제어시에 초기의 제어입력이 적었기 때문에 기준온도의 도달시간이 오래 걸렸고, 80도의 제어시는 초기 제어입력의 과다로 과도응답이 생기므로써, 기준온도로의 수렴시간이 오래 걸렸다. 시간이 지남에 따라 기준온도에 수렴하지만 이것은 전기로의 응답특성이 초기에 상태에 따라서 항상 변함을 알 수 있다. 이를 보강하기 위해서는 신경회로망의 지도입출력간에 좀 더 유연성 있는 학습을 위해서는 신경회로망의 학습 속도 단축과 전기로의 초기 상태에 따라 변하는 전기로의 특성을 파악하여 지도입출력 값을 조정하고, 퍼지집합의 소속함수의 형태를 조정하여 좀 더 유연성 있는 제어가 되도록 지속적인 연구가 필요하겠다.

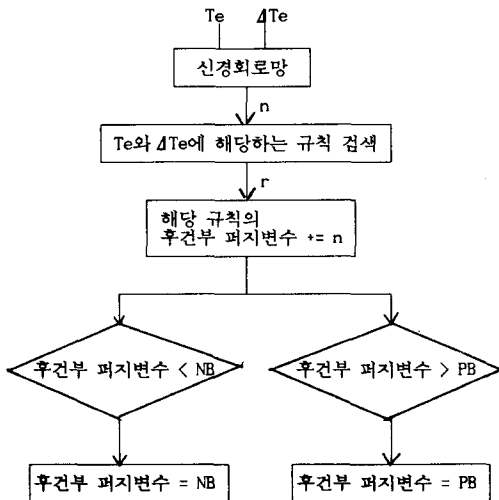


그림 5-1. 규칙 조정 순서도

n	Te	ΔTe	ΔFe
1	0	0	-3
2	0	0.5	-3
3	0	1	-2
4	0.4	0	-1
5	0.4	0.5	-1
6	0.4	1	-1
7	0.49	0	-1
8	0.49	0.5	-1
9	0.49	0.53	1
10	0.5	0	-1
11	0.5	0.47	-1
12	0.5	0.5	-1
13	0.5	0.53	1
14	0.5	1	1
15	0.51	0	-1
16	0.51	0.47	-1
17	0.51	0.5	-1
18	0.51	0.53	1
19	0.51	1	1
20	0.52	0	-1
21	0.52	0.47	-1
22	0.52	0.5	-1

23	0.52	0.53	1
24	0.52	1	1
25	0.6	0	-1
26	0.6	0.5	1
27	0.6	1	1
28	0.7	0	-1
29	0.7	0.48	-1
30	0.7	0.52	1
31	0.75	0	-1
32	0.75	0.46	-1
33	0.75	0.54	1
34	0.78	0	-2
35	0.78	0.5	1
36	0.78	1	1
37	0.8	0	-2
38	0.8	0.5	1
39	0.8	1	1
40	0.9	0	2
41	0.9	0.5	2
42	0.9	1	2
43	1	0	3
44	1	0.5	3
45	1	1	3

표 5-1. 신경회로망의 지도 입출력

6. 참고 문헌

- [1] E.H Madami, "Application of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant", Proc. IEE, Vol.121, No 12 pp. 1585-1588, 1974
- [2] Marzuki Khalid and Sigeru Omatu, "A Neural Network Controller for a Temperature Control System", IEEE, Control Systems, pp. 58-63, June 1992
- [3] Michio Sugeno, "Industrial Applications of Fuzzy Control", North-Holland, 1985.
- [4] 포항공대 신경회로 연구센터, "제6세대 신경컴퓨터의 원리및 응용", 1990
- [5] 한국과학기술원 강좌교재, "신경회로망 컴퓨터 : 이론, 응용, 구현", 1992. 8.24~8.27
- [6] 문석우, 강민구, 이종호, 허옥렬, 이봉국, "퍼지규칙을 이용한 전기로 온도제어", 한국자동제어학술회의, pp. 872-877, 1991. 10.22~10.24
- [7] C.C.Lee, "Intelligent Control Based on Fuzzy Logic and Neural Net Theory", Proceedings of the International Conference on Fuzzy Logic & Neural Networks, pp 759-764, 1990
- [8] Mikio Maeda, Takeo Sato, and Shuta Murakami, "Design of the Self-Tuning Fuzzy Controller", Proceedings of the International Conference on Fuzzy Logic & Neural Networks (Iizuka, Japan, July 20-24, 1990) pp. 393-396
- [9] Hiroyoshi NOMURA, Isao HAYASHI, Noboru WAKAMI, "A Learning Method of Fuzzy Inference Rules by Decent Method", IEEE International Conference on Fuzzy System, pp. 203~210, 1992
- [10] M.Mizumoto, "Realization of PID controls by Fuzzy control methods", IEEE International Conference on Fuzzy System, pp. 709-715, 1992