

# 온도환경 시험장비의 강인한 퍼지 자기조성 제어 시스템

°김인식, 윤일선, 남세규  
국방과학연구소

## Robust Fuzzy Self-Organizing Control System of Temperature Environmental Test Equipment

°In-Sik Kim, Il-Sun Yoon, Sae-Kyu Nam  
Agency for Defence Department

### ABSTRACT

A robust fuzzy self-organizing controller(SOC) is proposed for an environmental temperature chamber. Although fuzzy SOC can improve the performance of nonlinear system, the controller is ineffective to solve the performance degradation owing to the time varying factors. In this paper, we construct the fuzzy SOC with a predictive scheme based on the 386PC. The usefulness of the proposed scheme is shown through the comparison of the PI controller and the fuzzy controller.

### 1. 서 론

시스템의 특성이 복잡하여 수학적 모델링이 곤란한 경우에 퍼지제어는 기존 제어기들 보다 우수한 결과를 나타내는 것을 볼 수 있다. 그러나 시스템의 특성이 시간에 따라 변화하고 그 변화가 비선형적이라면 고정된 제어규칙 만으로는 만족스러운 결과를 얻기가 어렵다. 따라서 변화하는 시스템의 특성과 작동환경을 감지하여 제어규칙을 자동으로 조정하는 연구가 수행되어 왔다[1,2]. 퍼지 자기조정 제어(fuzzy self-organizing control : fuzzy SOC)는 단순한 방식의 퍼지 제어만으로는 좋은 결과를 얻기 어려웠던 비선형 시스템에 적용되어서 제어성능을 향상시킬 수 있었으나, 시간지연(time delay)이 심한 시변 시스템에 대하여는 성능개선에 한계점이 있었다. 물론 최근에 예견제어방식[3]이 발표되었지만, 시스템의 이상화된 모델이 필요하거나 응답예측에 많은 계산시간이 소요되어서 실제 제어기의 구현은 간단하지 않았다. 그러므로 시스템의 비선형성과 시변성에 대한 불확실성을 함께 고려하기 위한 제어방안은 수학적 제어보다는 유리한 측면이 있지만, 퍼지제어에서도 여전히 어려운 문제로 남아있다[4]

따라서 본 논문에서는 퍼지 자기조정 제어에 시간지연 보상을 위한 예견기능과 시스템 작동의 안전성을 높이기 위한 제한 조건을 부가한 제어방법을 제안하여 온도챔버에 적용하였다. 온도챔버는 Thermotron사의 WP-315-TCHM1-5-5[5]이며, 기존의 PI제어, 단순한 퍼지제어, 그리고 자기조정 제어의 결과를 비교하여 제안된 방법의 유용성을 보인다.

### 2. 퍼지 자기조정 제어

자기조정 제어기는 적절한 제어행동을 취하면서 변화하는 시스템 특성과 작동환경을 감지하여 성능을 향상시키도록 제어 방식을 변화시켜야만 한다[1]. 일반적으로 제어규칙이나 scaling factor를 수정하는 방법[2]이 소개되었으나 본 논문에서는 지식 베이스를 수정하고 지연시간을 보상하기 위한 예견제어를 부가한 방법을 제안한다. 자기조정 제어기는 그림 1와 같이 단순한 퍼지 제어기를 기반으로 하여 공정의 성능평가, 지식기반의 수정 및 예견제어 부분으로 구성된다. 입력변수는 설정온도  $T_0$ 와 측정온도  $T_C$ 와의 오차  $e$ 와 오차의 변화량  $ce$ 에 대한 퍼지변수  $E$ 와  $CE$ 로 구성하고, 출력변수  $DU$ 는 샘플링 시간  $h$ 이내에서의 히터(heater)나 냉동기(cooler)의 작동시간 변화량으로 하였다.

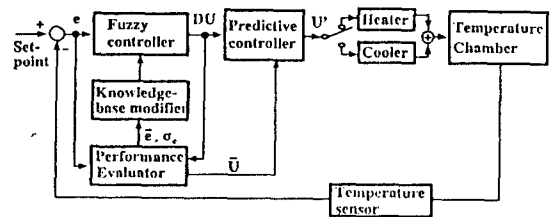


Fig. 1 Block diagram of fuzzy self-organizing controller

제어규칙은 식(1)과 같은 속도형을 적용하고, 기존 시스템의 제어행동을 관찰하여 표1과 같은 규칙기반을 획득하였다.

Rule  $k$  : If  $E$  is  $A_k$  and  $CE$  is  $B_k$ , Then  $DU$  is  $C_k$  (1)

여기서  $A_k, B_k, C_k$ 는 전체공간에서 정의된 퍼지변수중의 하나로 '음으로 크다, 음으로 중간이다, 음으로 작다, 영 근처이다, 양으로 작다, 양으로 중간이다, 양으로 크다'를 뜻하는 언어적 변수로서 그림 2에 나타내었다.

퍼지 조건명제의 연산으로는 Larsen의 product연산[6]을, 추론연산은 Zadeh의 sup-min연산을 사용하였다. 출력변수는 모멘트(moment) 개념을 이용하여 추론연산에 단순한 덧셈을 이용하였다. 자기조정 부분으로서 제어성능을 평가하여 지식기반을 수정하며, 지연시간을 보상하도록 한다. 현시점에서 과거  $m$ 개의 오차  $e$ 의 평균값  $\bar{e}$ 와 그 표준편차  $\sigma_e$ , 그리고  $U$ 의 평균값  $\bar{U}$ 를 사용한다.

$$\bar{e} = \frac{1}{m} \sum_{i=k}^{k+m} e_i \quad (2)$$

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{m \sum_{i=k}^{k+m} e_i^2 - (\sum_{i=k}^{k+m} e_i)^2}{m(m-1)}} \quad (3)$$

$$\bar{U} = \frac{1}{m} \sum_{i=k}^{k+m} U_i \quad (4)$$

자기조정 방법으로는  $\bar{e}$ 를 줄이는 방향으로 퍼지 입력변수  $E$ 의 영역을 좌 또는 우로 이동하고, 양과 음쪽의 변수의 폭을 상반되게 확대·축소하는 방법을 사용한다. 또한 제어출력의 심한 변화는 채터링(chattering)을 유발하므로 슬라이딩 제어(sliding control)의 평탄화 기법(smoothing technique)[7]을 본떠서  $\sigma_e$ 의 크기에 따라  $DU$ 의 폭을 축소하도록 한다.

Table 1. Fuzzy control rule

E \ CE	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZO
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZO	PS
NS	NB	NB	NM	NS	ZO	PS	PM
ZO	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	PB
PM	NS	ZO	PS	PM	PB	PB	PB
PB	ZO	PS	PM	PB	PB	PB	PB

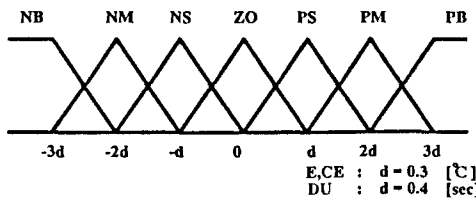


Fig. 2 Membership functions of input-output variables

지연시간을 갖는 공정에서 어느 시점에서의 제어성능은 그 지연시간 이전의 제어행동에 기인한 것으로서 공정의 이상화한 모델에 의한 보상기를 구성하며, 또한 이 지연시간도 설정온도에 따라 다르며, 작동환경에 따라서 변화하므로 공정의 성능평가지수에 의하여 적용시켜 가도록 한다. 만약 현상태에서의 온도 변화를  $G(n)$ 을 알고 있다면 현재온도  $TC(n)$ 과 제어입력인  $U(n)$ 에 의해 다음번 샘플시의 온도  $TC(n+1)$ 을 식(5)와 같이 예측할 수 있으며,  $TC(n+1)$ 가 설정온도  $T0$ 와 일치하도록  $U(n)$ 를 보상하여 새로운 제어입력  $U'(n)$ 를 생성해 낼 수 있게 된다;

$$TC(n+1) = TC(n) + [U(n) - \bar{U}] \times G(n) \quad (5)$$

$$U'(n) = \bar{U} + [T0 - TC(n)] / G(n) \quad (6)$$

여기서  $U$ 의 평균을 위한 샘플의 시료수는 시스템에 따라 경험적으로 결정된다. 온도변화를  $G(n)$ 은 단순히 설정한 시스템 모델에서 개략적으로 구한 초기값을 정성적인 규칙으로 시스템의 상태에 따라 계속 수정한다. 온도챔버를 단순 1차 시스템으로 모델링한다면;

$$\frac{T(s)}{U(s)} = \frac{K e^{-Ts}}{1 + \tau s} \quad (7)$$

초기 온도변화를  $G_0(t)$ 는 식(7)을 역라플라스 변환(Inverse Laplace transform)하고 미분하여 구한다;

$$G_0(t) = \frac{K(T-t)}{\tau^2} e^{-(T-t)/\tau} \quad (8)$$

여기에서  $K, \tau, T$  같은 한 점에서만 정상성을 가지며 설정온도가 바뀌면 달라진다. 또한 히터와 냉동기에 의한 변화율은 다르다. 그러므로 온도변화를  $G(n)$ 을 상승과 하강으로 분리하며 다음과 같은 절차에 의하여 실시간으로 제한된 범위내에서 변화시킨다.

Initial set  $G_u = G_d = G_0$

if  $\sigma_e > \sigma_r$

if  $\bar{e} > 0$ , then  $G_d(n) = G_d(n-1) + \Delta G$

else  $G_u(n) = G_u(n-1) + \Delta G$

if  $dU(n) > 0$ , then  $G(n) = G_u(n)$

else  $G(n) = G_d(n)$

endif

if  $G(n) > G_{max}$ , then  $G(n) = G_{max}$

if  $G(n) < G_{min}$ , then  $G(n) = G_{min}$

### 3. 실험 및 고찰

정밀한 첨단장비들의 환경성능 저하 여부를 시험하기 위한 온도 환경시험에 사용되는 챔버에서 온도의 정밀한 유지를 위한 제어는 필수적이다. 실험대상인 온도챔버는 미국

Thermotron사의 WP-315-TCHM1-5-5형 모델이며, 아나로그 형의 PI제어기가 장착되어 있다. 퍼지제어기는 온도센서, 14비트-A/D변환기, Digital Output을 사용하여 386PC상에서 C언어로 구현하였다. 입출력 및 퍼지추론의 계산시간은 0.1초가 소요되었지만, 기존 PI제어기의 파형을 관찰하여 샘플링 간격을 4초로 결정하였다. 이는 온도의 변화가 느리다라는 것과, 입출력과 제어계산에 소요되는 시간과 평균을 위한 샘플의 갯수를 함께 고려한 것이다. 설정온도는 단계적으로  $-20^{\circ}\text{C}$ 에서  $+20^{\circ}\text{C}$  그리고  $+60^{\circ}\text{C}$ 로 변화시키는 실험을 반복하였다. 그림 3에 (a) 기존의 PI제어, (b) 단순 퍼지제어와 (c) 퍼지 자기조정 제어의 실험결과가 비교되어 있다. 단순 퍼지제어는 PI제어에 비하여 정착시간이 줄어든 반면 채터링은 약간 증가하였다. 이러한 결과는 초기의 제어규칙이 시스템 특성변화에 적용하지 못한대서 기인한 것이다. 그렇지만 퍼지 자기조정 제어는 오버슈트(overshoot)현상이 완전히 제거되어 정착시간이 단축되었고, 정상상태온도의 표준편차도 감소되어 전체적인 제어성능이 크게 개선됨을 명확히 보여준다.

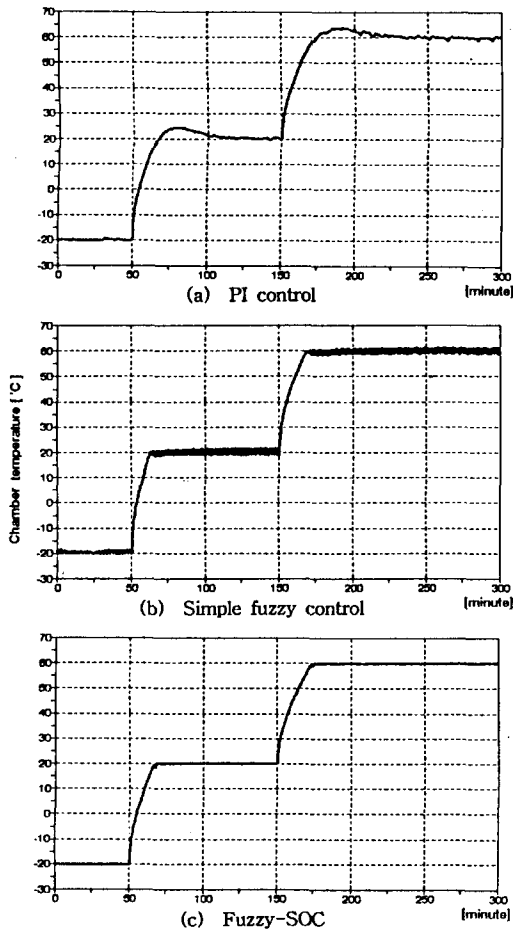


Fig. 3 Experimental results

#### 4. 결 론

본 논문에서 제안한 퍼지 자기조정 제어 알고리즘을 이용한 제어시스템으로 온도제어 실험을 수행한 결과 기존의 PI제어기에서 문제가 되었던 오버슈트를 제거하여 1시간이던 정착시간을 20분으로 단축하였고, 단순 퍼지제어기에서 발생한 채터링을 억제하여 정상상태에서 온도오차의 표준편차를 3배나 감소시켰다. 또한 온도오차의 평균도 단지  $0.05^{\circ}\text{C}$  밖에 되지 않는 정밀한 온도제어가 달성되었다. 제안된 알고리즘의 장점을 요약하면 자기조정 기능을 부가하여 지식기반 획득에 필요한 실험을 줄일 수 있고, 이상화 모델이 필요없는 예견제어의 도입으로 시변현상에 효과적으로 대처할 수 있게 된다. 이와 함께 제어입력에 제한조건을 반영하여 시스템의 안전성을 고려하였다. 결과적으로 수학적 모델링이 곤란한 시스템에 대하여, 축적된 경험을 표현한 언어적 제어규칙을 이용하여, 수학적 제어보다 오히려 성능이 정밀한 퍼지 제어시스템을 구현할 수 있다.

#### □ 참고문헌

- [1] T. J. Procyk and E. H. Mamdani, "A Linguistic Self-Organizing Process Controller", *Automatica*, vol. 15, pp.15-30, 1979.
- [2] S. Shao, "Fuzzy Self-Organizing Controller and Its Application for Dynamic Processes", *Fuzzy Sets and Syst.*, vol.26, pp.151-164, 1988.
- [3] S. Aoki, S. Kawach and M. Sugeno, "Application of Fuzzy Control Logic for Dead-Time Process in a Glass Melting Furnace", *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 38, pp.251-256, 1990
- [4] S. K. Nam, M. H. Lee and W. H. Yoo, "Predictive Sliding Control with Fuzzy Logic for Fuel-Injected Automotive Engines", *IMEchE, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, vol.207, 1993.
- [5] Thermotron Corp., "Instruction Manual for Thermotron Environmental Chamber Temperature - Humidity", 1983.
- [6] C. C. Lee, "Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller - Part I, II", *IEEE Trans. Systems Man and Cyber.*, vol.20, No.2, pp.404-435, March/April 1990.
- [7] J. J. E. Slotine and S. S. Sastry, "Tracking Control Nonlinear System using Sliding Surfaces with Application to Robot Manipulators", *Int. J. Control*, vol.38, no.2, pp.465-492, 1983.