

가변환경하의 불안정 시스템에 대한 자율적응 제어기 설계

김성희*

요 약

부품들에 대한 열반응 검증 시스템은 모델링이 없으므로 일반적으로 PID 알고리즘에 의해 제어된다. 그러나 이 알고리즘에 의한 제어는 적절한 제어에 있어서 많은 한계성을 지닌다. 이러한 문제를 해결하기 위해 시스템에 대한 자율 탐색기능을 갖는 퍼지 알고리즘에 기반 된 제어기를 설계한다. 퍼지 입력소속함수가 설정된 안정영역에 기반 되어 적용되고, 규칙기반이 시스템 반응에 기초되어 변환된다. 추론과 비퍼지화를 통해 계산된 출력값이 시스템 동작에 알맞은 값으로 변환된다. 이러한 조절을 통해 시스템이 불안정 영역으로 이동하는 것을 최소화시킨다.

1. 서론

현대 사회가 고도의 정보화 사회로 변화함에 따라 새로운 부품들의 개발이 필수 요소이다. 부품들에 대한 검증을 수행하여 안정성 여부 및 성능을 평가하여야 하며, 그 중에서도 온도 반응에 대한 검증은 필수 요소이다[1-2]. 온도 반응 검증을 수행하기 위해 온도 반응검증시스템은 설정된 온도의 안정온도 범위 안에서 온도의 지속적 유지가 중요하다. 온도반응 검증시스템들은 시스템의 효율을 높이기 위하여 짧은 시간에 보다 많은 수량의 부품 검증을 요구한다. 온도 반응 검증시스템에 대한 이러한 요구는 가능한 고속의 온도 검증을 수행시켜 외란(Disturbance)에 의한 온도의 교란을 발생시킨다. 이러한 시스템에 대한 정밀 온도 제어를 수행하기 위해 시스템에 대한 모델링을 요구하지만 시스템 내

부의 구조적 환경이 너무 복잡하여 시스템에 대한 모델링은 매우 어렵다. 모델링을 수행하더라도 시스템의 구조적 불확실성(Uncertainty) 때문에 시스템의 모델을 이용하여 제어를 수행하는 것은 불가능하다.

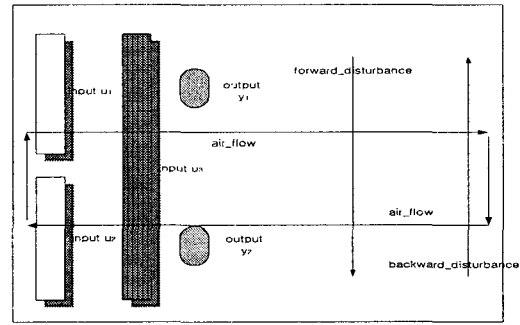
또한 일정한 온도 범위 내에서 온도를 유지시키기 위해 주변의 다른 부분과 온도의 절연성이 이루어져야하나 실제 시스템에서는 주변으로부터의 영향을 받아 온도의 교란이 발생되며, 주기적으로 공급되는 부품들이 갖는 온도에 대한 열적 반응 특성에 의해 온도의 교란을 발생시킨다. 이와 같이 사용 효율을 최대화시키기 위한 시스템의 설계와 안정화를 저해하는 시스템의 여러 요소들이 상호 유기적으로 얽혀져 온도 반응 검증시스템의 온도를 효율적으로 제어하는데 있어 제어 알고리즘들의 적용에 많은 제약을 만든다. 이러한 제약성 때문에 실제 시스템들에 있어서는 PID 제어기를 사용하고 있다[3]. 그러나 이러한 제어기는 시스템의 특성에 맞는 PID 이득을 반복적인 실험에 의한 분석을 통하여 얻

을 수 밖에 없으며, 작은 구조적 변화에도 시스템의 온도 특성이 급격히 나빠질 수 있다. 와 같은 문제의 해결을 위해 시스템에 대한 학습을 통한 제어기의 설계가 고려될 수 있다. 학습에 의한 제어 알고리즘으로는 인간의 학습을 모방한 방법과 자연계의 선택적 생존을 모방한 기법을 들 수 있다 학습에 의한 기법으로 신경망, 유전, 진화 등의 알고리즘 등을 적용할 수 있으나 온도 반응 검증시스템의 제어입력에 대한 온도 반응의 불규칙한 자연 특성 및 심한 외란의 발생에 의해 이와 같은 학습 알고리즘을 이용한 제어기 설계를 수행하기 어렵다. 이와 같은 제약에 구속됨이 없이 효율적으로 온도 반응 검증 시스템을 제어하기 위해 퍼지 알고리즘을 이용하여 수학적 모델 없이 학습에 의존되지 않는 제어기 설계의 필요성이 대두된다. 퍼지 제어기는 최적의 제어기를 설계하기 위하여 신경망이나 진화, 기타 알고리즘을 퍼지 알고리즘과 결합하여 제어기를 설계할 수 있다. 그러나 시스템이 갖는 자연 및 외란 그리고 입-출력들 사이에 강한 상호 종속으로 인하여 퍼지 제어기의 최적화를 위해 학습 알고리즘이 결합되는 제어기는 온도 반응 검증시스템에 적용하기 어렵다 [4-6]. 이러한 문제를 해결하고 각 시스템에 대해 설정된 제한조건 아래서 시스템의 특성에 적절히 적용되는 제어기를 설계하기 위하여 일반적 규칙을 바탕으로 각 시스템에 대해 자율적 탐색을 수행하는 알고리즘을 구현한다.

II. 시스템의 일반적 특성

온도 반응 검증시스템의 일반적 구조는 열원 및 냉원 그리고 센서를 포함한 기타 구성원들로

이루어진다. 그림 1에서 온도 반응 검증시스템의 일반적 구성을 보여준다.



(그림 1) 온도 반응검증 시스템의 일반적 구성
(Fig. 1) General thermal test system

일반적으로 온도 제어를 위한 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y1 = f_1(u1, u2, u3, df, db, uc1) \quad (1)$$

$$= h_1(u1, u2) + c_1(u3) + d_1(df, db) + uc1$$

$$y2 = f_2(u1, u2, u3, df, db, uc2) \quad (2)$$

$$= h_2(u1, u2) + c_2(u3) + d_2(df, db) + uc2$$

식 (1)과 식 (2)의 구성 변수는 다음과 같다.

y1, y2 : 센서 1과 2로부터의 출력

u1, u2 : 열원 1과 2로부터의 입력

u3 : 냉원 입력

df, db : 전향 외란, d : 열적외란

h1 : 열원으로부터 센서 1에 대한 영향

h2 : 열원으로부터 센서 2에 대한 영향

c1 : 냉원으로부터 센서 1에 대한 영향

c2 : 냉원으로부터 센서 2에 대한 영향

uc1, uc2 : 불확실성

이 시스템의 응답 반응은 온도 변화를 일으키는 각 요소의 영향에 대하여 다음의 일반적 특성을 갖는다. 센서로부터 측정되는 온도는 동일

한 크기의 열원 제어 입력($u_1=u_2$)에 대하여 y_2 에 대해서는 $h_1(u_1) > h_1(u_2)$ 이며 y_2 에 대해서는 $h_2(u_1) < h_2(u_2)$ 의 관계가 성립된다. 그리고 c_1 과 c_2 및 df 와 db 의 크기는 비교될 수 없다.

제시된 온도 반응 검증시스템을 제어하기 위하여 일반적으로 PID 제어기가 사용된다. 시스템의 열원 및 냉원의 입력 u_1, u_2, u_3 는 각각의 독립적인 계산에 의해 입력이 생성된다. 각각의 입력에 대한 수식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} u_1 &= K_p^{hot} * e_1 + K_v^{hot} * \dot{e}_1 + K_i^{hot} \int e_1 dt \\ u_2 &= K_p^{hot} * e_2 + K_v^{hot} * \dot{e}_2 + K_i^{hot} \int e_2 dt \\ u_3 &= K_p^{cold} * e_{select} + K_v^{cold} * \dot{e}_{select} + K_i^{cold} \int e_{select} dt \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)의 구성 변수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} e_1 &= \theta_1 - \theta_{desired}, \\ e_2 &= \theta_2 - \theta_{desired}, \\ e_{select} &= \theta_{selected} - \theta_{desired} \end{aligned}$$

$\theta_1, \theta_2, \theta_{select}$: Each temperature measured from sensor

K_p, K_i, K_v : PID gains

이러한 PID 제어기를 이용한 시스템 제어 시스템에 대한 수학적 모델이 없으므로 각 시스템에 대한 최적의 PID 이득은 일반적으로 반복적 실험에 의한 분석을 통해 구한다. 그러나 같은 모델의 온도 반응 검증시스템들이라 할지라도 예상되지 못한 구조적 차이가 발생할 수 있으며 따라서 같은 PID 이득에 대해서도 다른 반응이 나타난다.

이와 같은 문제를 해결하기 위해서는 같은 모델의 시스템이면서 다른 반응 특성이 나타나는 모든 시스템에 대한 원인 분석을 수행해야만 한

다. 그리고 분석을 통하여 동일한 특성이 나오도록 반응이 일치하지 않는 모든 시스템을 구조적으로 조절하거나 각 시스템 마다 그 특성을 분석하여 최적의 이득값을 구해야만 한다. 그러나 두 방법 모두 현실적으로 적용하기가 매우 어렵다.

이를 해결하기 위해 각 시스템에 대하여 자율적으로 시스템의 응답 특성에 적용될 수 있는 제어기의 설계가 요구된다.

III. 퍼지 알고리즘을 이용한 적응 특성 제어기 설계

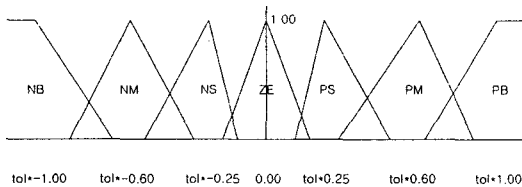
제어기에서는 온도 반응 검증시스템에서 불규칙적이고 급격히 발생하는 외란 및 온도 지연 현상 등에 효과적으로 대처하기 위하여 PD 형의 제어기를 설계한다.

전자 부품의 온도 반응 검증시스템에 대한 제어를 수행하기 위해 제어되는 시스템의 온도 반응에 대한 분석을 수행한다.

이와 같은 특성을 바탕으로 안정 온도 영역에서 온도에 대해 어느 정도 유동적인 상태의 흐름이 발생할지라도 온도를 안정 영역에서 최대한 유지하도록 온도 반응 검증시스템의 제어를 수행한다. 먼저 시스템을 제어하기 위해 시스템 응답 반응 분석에 의한 일반적 특성의 도출을 통해 퍼지 제어기의 입력 소속함수를 안정 범위와 연계하여 설정한다. 오차의 퍼지화를 위한 입력소속 함수들을 그림 4와 같이 구성한다.

오차 변화량에 대한 소속함수는 오차 변화량에 대한 정규화 과정에서 조절을 통하여 소속함수에 대한 변화 없이 같은 소속함수를 오차(e)

와 오차 변화량(ce)이 공유하도록 한다. 이는 제어기 설계의 최대 간략화를 위해 소속함수를 공유시킨 것이다.



(그림 2) 오차에 대한 입력 소속함수
(Fig. 2) Fuzzy membership function for error

설정된 소속함수를 이용하여 제어 규칙 테이블을 표 1과 같이 구성한다.

<표 1> 설계된 PD형 퍼지 규칙 표

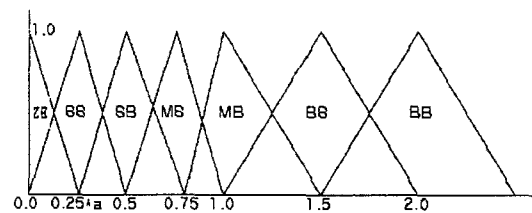
<Table 1> Rule base table for the designed PD type fuzzy controller

e \ ce	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	ZE	ZE	ZE	ZE	SS	SB	MS
NM	ZE	ZE	ZE	ZE	SS	MB	MB
NS	ZE	ZE	ZE	ZE	MS	BS	BS
ZE	ZE	ZE	ZE	SS	SB	BB	BB
PS	ZE	ZE	SS	MS	MB	BB	BB
PB	ZE	ZE	SB	MS	BS	BB	BB
PN	ZE	ZE	MS	MB	BB	BB	BB

온도 반응 검증시스템에서 열원에 의한 고온에서의 온도 반응은 대부분의 작업 환경이 실온이므로 온도가 자연 하강하는 방향으로 진행하고, 냉원에 의한 저온에서의 반응은 온도가 자동 상승하는 방향으로 진행한다. 이런 특성을 가지고 있는 온도 반응 검증시스템에서 자연적 하강이나 상승을 최소화하고 안정 영역에서 외란에 의한 불안정 영역으로의 온도 이동을 최소화하며 외란이 약한 상황에서 시스템이 보다 강

건해지기 위하여 규칙 테이블에서 표시된 대각선 방향의 용어 항들에 대해 시스템의 온도 반응에 따라 규칙부의 선택적 조절을 수행한다. 이러한 조절 과정은 시스템의 기계적 및 구조적 특성과 관계된다.

규칙 테이블에서 표시된 출력 용어 집합의 소속함수는 그림 3과 같다.



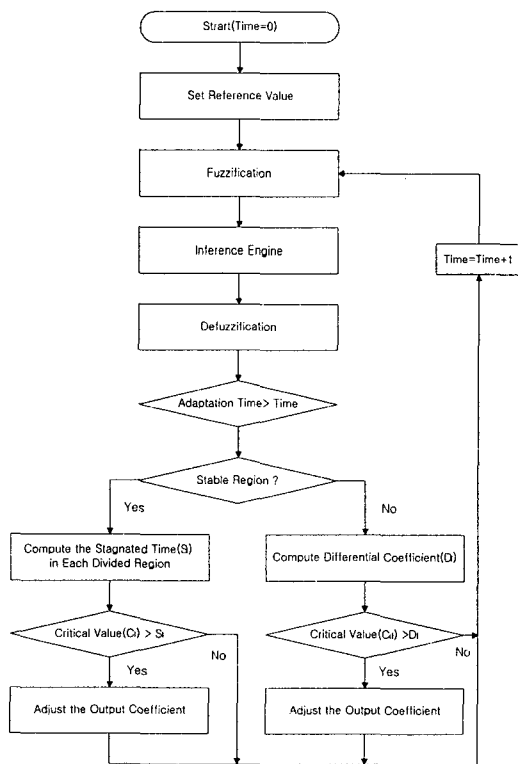
(그림 3) 제안된 제어기의 출력 소속함수
(Fig. 3) The output membership function of the proposed controller

그림 3의 출력 소속함수에서 a는 검증시스템의 온도를 보다 안정적이고 효율적으로 제어하기 위해 조절 가능한 파라미터이며, 비퍼지화는 무게 중심법을 적용한다.

퍼지 추론 및 비퍼지화 과정에 의해 생성된 제어 입력값들은 변환과정을 통해 시스템의 열원과 냉원을 구동시키기 위한 실제적 제어 입력값들로 변환된다. 이와 같은 변환에서 시스템의 반응 특성이 각 시스템마다 차이가 발생하더라도 충분히 제어 가능하도록 변환에 대한 조절을 수행해야만 한다. 이를 해결하기 위하여 자율적 탐색에 의한 변환을 수행한다. 자율적 탐색은 열원과 냉원의 반응 특성에 따라 최적의 변환을 수행하는 비례 파라미터에 대한 탐색을 수행한다[7]. 시스템은 먼저 외란 및 온도 반응 지연이 온도 변화에 크게 영향이 미치지 않는 상태에서 안정 온도 영역에 도달 된다. 그리고 온도 반응 검사가 수행되는 전자 부품의 공급에 의해 급격

하고 불규칙적인 외란 및 예측될 수 없는 지연 현상이 발생된다. 시스템의 이러한 특성에 대해 제어기는 최대한 강건한 특성을 지녀야 한다. 또한 열원 및 냉원에 의한 응답 반응은 온도 대역에 따라 각기 다르므로 각 대역별로 적절한 제어입력에 대한 조절이 요구된다. 이러한 작업을 수행하기 위하여 먼저 설정될 수 있는 최고 온도부터 최저 온도까지의 영역을 적절히 분할한다. 그리고 분할된 각 온도 영역에 대해 적절한 비례 파라미터의 탐색을 수행한다.

그림 4에서 자율적 탐색의 수행에 대해 보여 준다.

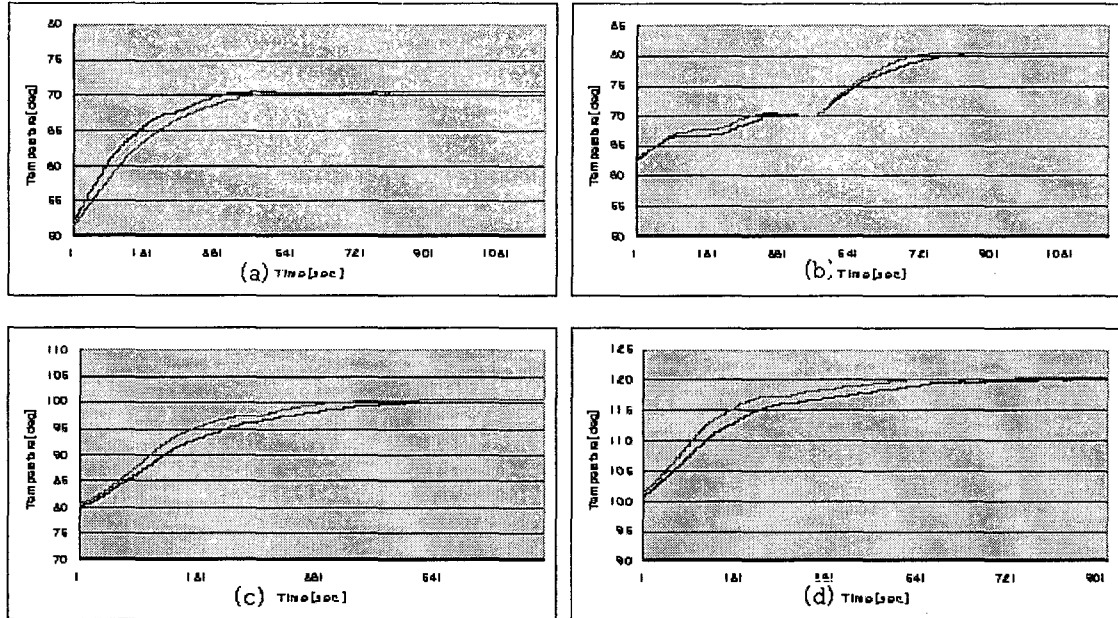


(그림 4) 출력의 조절을 위한 자율적 탐색
(Fig. 4) Self-searching for output control

먼저 설정 온도가 결정된 후 일정 기간의 적응 기간을 둔다. 적응기간이 지난 후 시스템의 안정영역(Stable Region) 도달 여부를 검사한다. 만약 안정영역에 도달하지 못하였다면 온도의 상승 기울기를 이용하여 비례파라미터의 조절을 수행한다. 즉 온도 상승의 기울기를 임계값과 비교하여 조절을 수행한다. 그와 달리 시스템이 안정영역에 도달한 상태라면 안정영역 안에서의 정체시간을 이용하여 파라미터의 조절을 수행한다. 이와 같이 온도의 상승을 수행하면서 기울기 및 정체시간에 대한 지속적인 감시를 통해 비례 파라미터에 대한 탐색을 수행한다.

IV. 모의 실험 및 고찰

지연 및 외란을 갖는 온도 반응 검증시스템에 대해 자율적 탐색을 갖는 퍼지 제어기에 대하여 유효성 검증을 위한 실험을 수행하였다. 실험이 수행되는 시스템은 온도 반응 검증시스템이 갖는 일반적 외란 및 지연 기타 여러 고유한 특성을 지녔으며, 일반적 온도 검증이 수행되는 온도 범위에서 실험이 수행되었다. 실험이 수행된 결과가 다음에 보여 진다. 시스템의 모든 센서들은 각 열원으로부터 영향을 받는다. 따라서 각 센서로부터 측정되는 온도는 각 열원의 입력에 대한 조절을 통해 안정화된다. 시스템의 온도가 설정된 온도 부근에서 안정화된 후 온도에 대한 반응 검사가 수행되는 부품들이 외부로부터 공급되며, 이러한 공급에 의해 시스템에서는 급격하면서도 불규칙하게 외란이 발생된다. 입력으로 사용되는 히터는 2[kW]의 Cartridge 히터가 사용되고, 센서는 100[Ω]의 백금 RTD가 사용되며 센서 저항의 온도 상승을 줄이기 위하여



(그림 5) 제안된 제어기에 의한 응답 반응((a) 70도, (b) 80도, (c) 100도, (d) 120도)

(Fig. 5) The system response by the designed controller(70°C, 80°C, 100°C, 120°C)

낮은 전류를 사용하였다. 또한 측정의 정확도를 높이고 결선의 길이에 의한 측정 오차를 줄이기 위한 결선 방식을 채택하였다. 실험 온도는 70도 부터 120도에서 진행되었으며 안정도는 ± 3 도이다.

V. 결론

본 연구에서는 온도 반응 검증시스템에 대해 온도 제어를 수행하기 위하여 자율적 적응 특성을 갖는 퍼지 제어기를 설계하였다. 이 검증시스템은 그 구조적 특성에 의해 모델링을 수행하기 어려우며, 근사화된 모델링을 수행하여도 불확실성이 커서 그 모델을 적용하여 제어기를 설계할 수 없다. 또한 시스템은 불규칙적인 외란

및 지연 현상을 갖으며 시스템이 사용되는 작업 현장마다 동일 제어 입력값에 대한 출력 반응이 달라질 수 있다. 그 외의 시스템이 갖는 여러 가지 특성에 의해 시스템에 대한 효율적인 온도 제어를 수행하기 매우 어렵다. 이런 제약들에 구속됨이 없이 시스템을 안정적으로 제어하기 위하여 먼저 규칙부는 부분적 조절이 가능하도록 구성되었으며, 입력 퍼지 소속함수는 안정 온도 범위에 따라 연동되어 변화되도록 설계하였다. 또한 출력 소속함수는 최소한의 선택적 변화가 가능하도록 하였으며, 퍼지 추론된 결과를 시스템에 대한 실제적 입력값으로 변환시키기 위하여 분할된 온도 대역별로 비례 파라미터에 대한 탐색이 수행되도록 하였다. 실험을 통하여 제안된 자율적 퍼지 제어기의 유효성을 입증하였다. 실험은 시스템이 정적인 상태 및

동적인 상태에서 수행되어졌다. 시스템에서 발생하는 외란은 일반 작업 환경과 같게 불규칙적이며 급격히 발생되어졌으며, 지연 현상도 작업 현장과 동일하게 발생되었다. 실험 결과 제안된 각 부분의 알고리즘들은 상호 유기적으로 결합되어 적절한 반응을 나타내었다. 먼저 안정도 범위와 연계된 퍼지 입력 소속함수는 규칙부와 연계되어 입력되는 값들에 대하여 충분히 시스템의 안정성을 확보할 수 있도록 적절히 매칭되어졌다. 시스템의 특성에 따라 부분적인 조절이 가능하도록 구성된 규칙부는 퍼지화된 입력값들에 기반하여 급변하는 환경에 대해 폭넓게 적용됨을 보여주었다. 또한 추론된 결과값이 시스템에 대한 실제 제어 입력값으로의 변환 후 설정 온도가 변하여도 일정하게 안정적으로 제어됨을 보여 탐색 알고리즘이 유효함을 보여 주었다. 온도 반응 검증시스템의 초기 온도 안정화 및 외란 발생 후 온도 안정화 과정에서 온도 상승에 의한 불안정 온도 영역으로의 이동이 발생되지 않아 각 열원의 상호 영향에 대한 안정화 알고리즘이 유효함을 보여주었다.

- [3] MARTIE BROWN AND CHRIS HARRIS, NEUROFUZZY ADAPTIVE MODELING AND CONTROL, Prentice Hall, pp.409-437, 1994.
- [4] David A. White and Donald A. Sofge, Handbook of Intelligent Control: Neural, Fuzzy, and Adaptive Approaches, Multi-Science Press, pp.118-123, 1992.
- [5] NilsJ. Nilsson, ARTIFICIAL-INTELLIGENCE: A New Synthesis, Morgan Kafmann Publishers, pp.51-55, 1998.
- [6] Frank H. Eeckman, Neural Systems: ANALYSIS AND MODELING, KLUWER ACADEMIC Publishers, pp.5-28, 1992.
- [7] Lin, C. T., Neural-network-based Fuzzy logic control and Decision system," IEEE Trans. Compute, Vol.40, pp.1320-1336, 1991.

참고문헌

- [1] Ben G. Streetman, SOLID STATE ELECTRONIC DEVICES, Prentice Hall, pp.52-90, 1988.
- [2] ROBERT BOYLESTAD, LOUIS NASH-ELY, ELECTRONIC DEVICES James A. Freeman, David M. Skapura, Neural Networks: Algorithms, Applications, and Programming Techniques, ADISSON-WESLEY, pp.179-220, 1991.

Design of Self-Adapted Controller for Unstable System in Variable Environment

Sung-Hoe Kim*

Abstract

The system that is thermal test system for elements has been controlled generally by PID algorithm because of its characteristic. There is not a mathematical model for the system. So the system that is use the PID controller is not properly operated. To solve this problem, we propose a fuzzy algorithm that parameters and rule base is selected by self-searched algorithm for each system. The input fuzzy membership function is adapted based on the set stable range. Output membership function is nearly fixed but some parameter is adjustable. The rule base is changed under basis on the system response. The output value computed through inference and defuzzification is mapped into a value that is proper for the system operation. Through this regulation, it will be possible to prevent the temperature of system to go into the unstable temperature.

* Woory Technology-Center