

FUZZY PID 방법을 이용한 개별 공조시스템의 급기온도 제어

장 영 준, 박 영 칠^{*}, 정 광 섭^{**}, 한 화 택^{***}, 이 정 재^{****}

인하대학교 기계공학과 대학원, ^{*}서울산업대학교 제어계측공학과, ^{**}서울산업대학교 건축공학과,
^{***}국민대학교 기계자동차공학부, ^{****}동아대학교 건축공학과

A FUZZY PID Control of Supply Duct Outlet Air Temperature for PEM

Young Joon Chang, Young Chil Park^{*}, Kwang Seop Chung^{**},
Hwa Taik Han^{***}, Jurng Jae Yee^{****}

Department of Mechanical Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea

^{}Department of Control and Instrumentation Engineering, SNUT, Seoul 139-743, Korea*

*^{**}Department of Architectural Engineering, SNUT, Seoul 139-743, Korea*

*^{***}School of Mechanical and Automotive Engineering, Kook Min University, Seoul 136-702, Korea*

*^{****}Department of Architectural Engineering, Dong A University, Pusan 604-714, Korea*

(Received October 16, 2001; revision received February 20, 2002)

ABSTRACT: The work presented here provides a control of the supply duct outlet air temperature in PEM (personal environment module) using fuzzy PID controller. In previous work, PID control systems were used, but the result shows that the outlet air temperature and electric heater regulating voltage were oscillated. Fuzzy PID control systems are designed to improve the system response obtained using PID control and implemented experimentally. Also, PID controller and fuzzy controller without PID logic are provided to compare the result with that of the fuzzy PID controller. Data obtained shows that the fuzzy PID control system satisfies the design criteria and works properly in controlling the supply air temperature. Also it has better performance than the previous result obtained using PID control.

Key words: PEM(개별 공조시스템), Electric heater control(전기히터 제어), PID control(PID 제어), Fuzzy control(퍼지 제어), Fuzzy PID control(퍼지 PID 제어)

기 호 설 명

K_P : 비례 이득(proportional gain)

K_I : 적분 이득(integral gain)

K_D : 미분 이득(derivative gain)

u : 퍼지 제어 출력 [V]

e : 입력 오차 신호

e_f : 단순 퍼지 제어기의 입력 오차 신호

L : 입력 소속 함수의 한계치

T : 샘플링 주기(sampling period) [sec]

K_h : 전기 히터 발열량과 공급 전압의 변환 비율 [W/V]

\dot{q} : 전기 히터의 발열량 [W]

T_i : 급기 온도 [°C]

T_o : 히터실 출구 온도 [°C]

T_{cmd} : 급기 온도와 설정 온도의 차 [°C]

† Corresponding author

Tel.: +82-2-970-6541; fax: +82-2-949-2654

E-mail address: ycpark@mail.snut.ac.kr

상첨자

~ : 대기 온도와의 차

하첨자

- p : 비례 제어
- i : 적분 제어
- d : 미분 제어
- f : 단순 퍼지 제어
- 1~3 : 단순 퍼지 제어의 입력

1. 서론

실내 공간의 쾌적도 향상 및 에너지 절약 측면에서 기존 방식에 비해 우수한 개별 공조시스템(personal environment module)은 국부적인 공간을 재실자의 요구에 따라 독립적으로 공조하는 방식이다. 하지만 좁은 공간을 대상으로 하기 때문에 재실자가 급기시 기류의 속도감을 느끼지 않아야 하며, 따라서 비교적 작은 범위의 제한 유속이 존재한다. 또한 개별 공조시스템은 설치 공간의 제약으로 인해 시스템의 내부에 공기의 충분한 혼합을 위한 혼합실(mixing chamber)의 설치가 불가능하며 따라서 온도의 균일화가 어렵다. 또한 재실자의 요구에 따라 급기 온도가 정확한 범위 내에서 유지되어야 하며, 적용 시간이 빨라야 하는 특성은 지니고 있다. 개별 공조시스템의 급기 온도는 공기가 급기관을 통과하는 동안 내부에 설치되어 있는 전기 히터의 발열량을 제어함으로써 조절이 가능하다.

본 연구의 목적은 퍼지 PID 제어를 구성하여 개별 공조시스템의 급기 온도 조절에 적용함에 있다. 기존 연구에서는 PID 방법을 사용하여 급기 온도의 제어를 수행하였다.⁽¹⁾

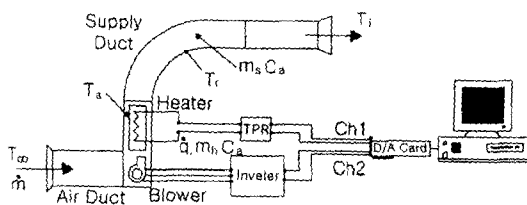


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

그 결과 충분히 향상된 결과를 얻었지만, 시스템에 적합한 각각의 이득을 결정하는 데 어려움이 있었고 실제 적용에서 발생한 전열량을 초과하는 입력 신호가 전기 히터의 포화 상태를 유발 시킴으로써 정격 초과와 제어 신호의 요동 현상이 발생한 바 있다.

따라서 본 연구에서는 위에서 나타난 문제점들을 해결하고 좀더 정확하고 신속한 응답 특성을 얻기 위해 기존의 PID 이득을 조합을 통해 새롭게 정의하고 퍼지 제어 알고리즘을 구성하여 튜닝하는 퍼지 PID 제어를 구성하여 이를 개별 공조시스템에 적용하여 급기 온도의 제어를 수행하였다.

이를 위해서 각각의 이득을 퍼지 제어를 통해 조절 가능한 퍼지 PID 제어를 구현함과 동시에 단순 퍼지 제어를 구성하여 기존 연구의 결과와 비교하여 향상된 응답 특성을 입증하는 연구를 수행하였다.

2. 열전달 모델링

Fig. 1은 실험에 사용된 개별 공조시스템의 난방 장치 구성도이다. 기존 연구에서는 PID 제어를 설계하기 위하여 난방 장치의 동특성을 수학적으로 모델링하는 작업을 수행하였다. 즉, PID 이득을 결정하기 위해 시스템의 특성을 미분방정식의 형태로 표현하였으며 root-locus 방법을 이용하여 이득을 결정하였다. 이를 위해 시스템의 선형화된 열전달 지배방정식의 구성을 위한 방법으로 히터실과 급기관을 별도의 검사체적으로 설정하여 각 검사체적 안에서의 온도를 일정하다고 가정하고 해석하는 lumped capacitance method를 이용하였다. 지배방정식에 포함된 열용량, 전열면적, 열전달계수 등의 상태량 들은 전체 유동을 난류 유동으로 가정한 후 열전달계수 표를 이용하여 직접 계산하였다.

Fig. 2는 본 연구에 사용된 제어시스템으로서 미분방정식의 형태로 표현된 지배방정식은 Laplace 변환에 의해 전달 함수의 형태로 변환되어

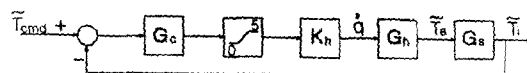


Fig. 2 Control system block diagram.

크게 히터실 총 전달함수(G_h)와 급기관 총 전달함수(G_s)의 형태로 제어시스템에 포함된다. 난방 장치의 열전달 모델링 및 상태량 계산 과정에 관한 자세한 내용은 참고문헌에 제시되어 있다.⁽¹⁾

3. 급기 온도의 제어

본 연구에서의 제어기는 PC에서 Visual C++를 사용하여 구현하였으며, 열전대를 사용하여 측정된 급기관 출구 온도, 입구 온도, 대기 온도와 air transmitter를 사용하여 측정된 유속은 LAN으로 연결된 데이터 로거를 통하여 PC로 입력된다.

설정 온도(T_{cmd})와 출구 온도(T_i)의 차는 제어기 G_c 에서 히터에 공급되는 전압으로 변환되어 PC에 설치되어 있는 12비트 D/A 카드를 통하여 히터 전류 조정기(TPR)의 입력 신호(최대 5V)로 공급된다.

3.1 비례-미분-적분 제어

PID 제어기는 P 또는 PD 제어에서 발생하는 정상상태 오차를 감소시키기 위해 사용되었으나 적분 제어기의 포함으로 시스템의 안정도를 저하시킬 수 있다. 기존 연구의 결과로서 인용되어진 Fig. 3에서 볼 수 있는 바와 같이 PID 제어기는 root-locus 방법을 이용하여 정격 초과를 유발시키지 않는 범위 내에서 각각의 이득을 산출하여 구성되었으나 실제 응답에서는 정격 초과가 발생하였으며 제어 신호가 요동치고 있는 것을 볼 수 있다.⁽¹⁾ 하지만, 정격 초과를 방지하고자 적분 제어기의 이득을 감소시켰을 경우 응답 속도가 현저

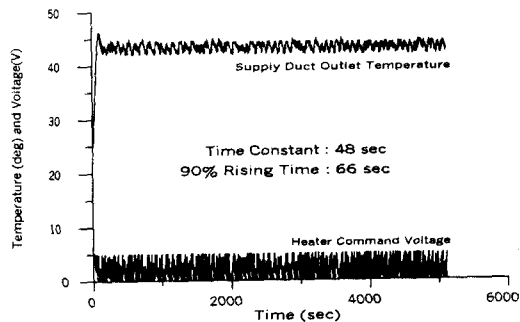


Fig. 3 System response of PID controller when $K_P=0.7$, $K_D=2.19$, $K_I=0.013$.

히 감소하여 빠른 응답 속도를 요구하는 개별 공조시스템의 요구에 충분치 못한 결과를 나타냈다.

3.2 퍼지 제어

퍼지 논리는 기존의 논리 체계에 비해 인간의 사고 측면에 많은 유사성을 가지고 있으므로 불확실한 현상을 기술하는 데 효과적으로 이용되고 있다. 퍼지 제어는 이러한 퍼지 논리에 기초를 두고 있으므로 비선형적 이고 복잡한 동적 특성의 변화를 지닌 시스템에 적용될 수 있으며 PID 같은 기존의 방법과는 달리 주어진 상황에 따라 전문가의 경험적 근거와 지식을 바탕으로 제어 규칙을 자체적으로 설정하여 적용 가능하다.⁽²⁾

퍼지 제어는 Fig. 4와 같이 제어 입력을 퍼지 규칙에 의해 소속 함수(membership function)로 바꾸어 주는 퍼지화 과정과 퍼지 입력을 퍼지 규칙을 이용하여 퍼지 결과를 추론하는 추론 과정 및 퍼지 집합으로 표시된 퍼지 출력을 보통의 수치로 변환시키는 비퍼지화 과정으로 나누어 수행된다.⁽³⁾

현재 널리 사용되고 있는 퍼지 제어 방식은 다음과 같이 크게 세 가지로 구분된다.⁽⁴⁾

- (1) 정확한 모델링 없이 경험적 근거를 바탕으로 퍼지 추론하는 방법(단순 퍼지 제어)
- (2) 정확한 수학적 모델을 바탕으로 하는 방법
- (3) 퍼지 논리와 기존 방법을 조합하는 방법(퍼지 PID 제어)

본 연구는 앞서 밝힌 대로 기존의 연구에서 제안된 PID 이득의 조합을 바탕으로 한 세 입력 신호를 퍼지 제어기를 구성하여 조정하여 제어를 수행하는 (3)번 방식을 근간으로 하고 있다. Fuzzy PID 제어는 일반적으로 각각의 이득을 퍼지 제어기를 구성하여 조절하는 방식으로 사용되어지며 현재 여러 분야에서 활발하게 적용되고 있다. 하지만 본 연구에서는 단순히 PID 이득을 튜닝

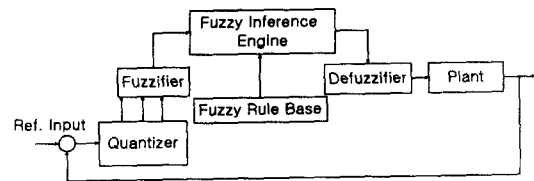


Fig. 4 Block diagram of fuzzy controller.

하는 방법과 달리 새롭게 유도된 PID 이득의 조합을 사용하였다. 또한 성능 비교를 위하여 (1)번과 같은 단순 퍼지 제어를 구성하여 결과를 비교 분석하였다.

3.2.1 퍼지 PID 제어

퍼지 PID 제어기의 세 입력은 아래에 정의된 PID 제어식으로부터 유도된다.⁽⁵⁾

$$U(t) = K_P e(t) + K_I \int e(t) dt + K_D \dot{e}(t) \quad (1)$$

이때, 입력 오차 $e(t)$ 는 설정 온도와 급기 온도의 차이이며, $\dot{e}(t)$ 는 입력 오차의 변화량이다. 식(1)은 Laplace 변환에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$U(s) = K_P E(s) + K_I \frac{E(s)}{s} + K_D sE(s) \quad (2)$$

위 식을 z -변환시키기 위하여 적분 이득항은 Trapezoid 법칙을 사용하여 $s = \frac{2}{T} \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}$ 로 치환

하였고 미분 이득항은 $sE(s) = \dot{E}(z)$ 로 치환하였으며 분모를 소거시켜 정리한 결과는 다음과 같다.⁽⁶⁾

$$U(z)(1-z^{-1}) = K_P E(z)(1-z^{-1}) + K_I \frac{T}{2}(1+z^{-1})E(z) + K_D \dot{E}(z)(1-z^{-1}) \quad (3)$$

식(3)을 이산 시간 영역으로 변환하여 정리하면 다음과 같이 식(4)를 얻을 수 있다.

$$u(nT) - u(nT-T) = K_P e(nT) - K_I \frac{T}{2} e(nT) + 2K_I \frac{T}{2} e(nT) - \left\{ K_P e(nT-T) - K_I \frac{T}{2} e(nT-T) \right\} + K_D \{ \dot{e}(nT) - \dot{e}(nT-T) \} \quad (4)$$

(단, $\dot{e}(nT) = \frac{e(nT) - e(nT-T)}{T}$)

식(4)를 자세히 보면 연속 PID 이득이 일정한 형태로 정리되어 있는 것을 볼 수 있다. 이런 동일

한 형태의 값들로 묶어 정리한 후 z -변환시킨 결과가 최종적으로 본 연구에 사용된 식(5)로 이산 시간 영역에서의 PID 이득은 연속 PID 이득과 sampling 주기의 조합으로 새롭게 정의되었다.

$$U(z) = \tilde{K}_P E(z) + \frac{\tilde{K}_I}{1-z^{-1}} E(z) + K_D \frac{1-2z^{-1}+z^{-2}}{1-z^{-1}} E(z) \quad (5)$$

$$(\text{단, } \tilde{K}_P = K_P - \frac{TK_I}{2}, \tilde{K}_I = K_I T, \tilde{K}_D = \frac{K_D}{T})$$

따라서, 본 연구에서 새롭게 정의된 이산 시간 영역에서의 PID 이득은 기존 연구에서 결정된 PID 이득과 구분되어야 하며 식(6)에 정의된 세 오차 신호가 이와 같이 결정된 이득과 연산되어 최종 퍼지 제어기로의 입력으로 결정된다. 본 연구에서는 전 과정에서 sampling 주기를 1초로 설정하였다.

$$\begin{aligned} e_P(nT) &= \tilde{K}_P e(nT) \\ e_I(nT) &= e_I(nT-T) + \tilde{K}_I e(nT) \\ e_D(nT) &= K_D \{ e(nT) - e(nT-T) \} \end{aligned} \quad (6)$$

Fig. 5는 제어 입력을 퍼지 집합으로 변환시키기 위해 소속 정도(membership grade)를 부여하기 위한 소속 함수(membership function)를 나타낸 것이다. 세 입력은 p(positive)와 n(negative)의 삼각형 소속 함수에 의해 소속 정도를 갖게 되며 소속 함수의 한계치 L 은 특정값으로 고정시키지 않고 수치 해석에 의해 결정된 범위 내에서 변화시키면서 제어를 수행하였다. 제어 출력 소속 함수는 Fig. 6과 같이 p, n, pl(positive large), nl(negative large)의 퍼지 라벨(fuzzy label)로 표

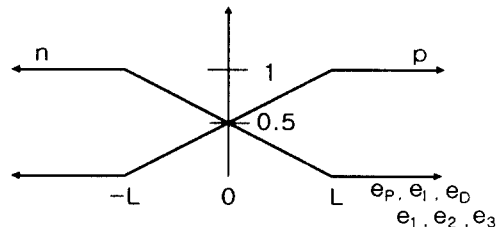


Fig. 5 Input membership function.

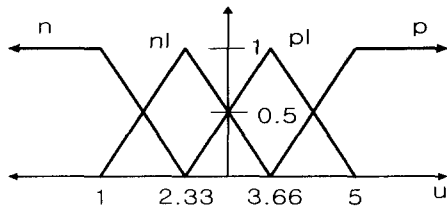


Fig. 6 Output membership function.

Table 1 Fuzzy control rule for u

	e_P	e_I	e_D	u
R1	n	n	n	nl
R2	n	n	p	n
R3	p	n	n	n
R4	p	n	p	p
R5	n	p	n	n
R6	n	p	p	p
R7	p	p	n	p
R8	p	p	p	pl

현된 네 개의 삼각형 소속 함수로 구성되었으며, 각 퍼지 라벨의 수치는 시스템의 특성에 따라 히터 공급 전압 1~5 V의 범위 내에서 설정하였다.

퍼지 입력에 대한 퍼지 출력의 추론을 위하여 Table 1과 같이 8개의 퍼지 규칙을 구성하였다. 추론 과정에 사용된 최소 최대법에 의거하여 세 퍼지 입력 가운데 최소값이 퍼지 출력(u)으로 선택되어 비퍼지화 과정을 거쳐 실제 제어 출력인 히터 공급 전압으로 결정된다. 본 연구에서는 비퍼지화 과정으로 무게 중심법을 사용하였다.

3.2.2 단순 퍼지 제어

본 연구의 단순 퍼지 제어기는 PID 이득과 관계없이 정의된 제어 입력이 직접 퍼지 제어기에 입력되는 점에서 위에서 정의했던 퍼지 PID 제어기와 구분되며 명칭의 혼동을 방지하고자 단순 퍼지 제어로 명명하였다. 단순 퍼지 제어기의 경우 analog PID control에서 사용된 PID 이득항을 trapezoid 법칙을 이용하여 이산화시키고 이를 퍼지 제어기의 입력으로 사용하였다.⁽⁷⁾

$$\begin{aligned}
 u_P(z) &= E(z) \\
 u_I(z) &= \frac{T}{2} \frac{1+z^{-1}}{1-z^{-1}} E(z) \\
 u_D(z) &= \frac{2}{T} \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} E(z)
 \end{aligned} \tag{7}$$

이산 시간 영역에서 제어기의 세 입력을 다시 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 e_1(nT) &= e_f(nT) \\
 e_2(nT) &= e_2(nT - T) \\
 &\quad + \frac{T}{2} (e_f(nT) + e_f(nT - T)) \\
 e_3(nT) &= -e_3(nT - T) \\
 &\quad + \frac{2}{T} (e_f(nT) - e_f(nT - T))
 \end{aligned} \tag{8}$$

제어 입력과 출력은 퍼지 PID 제어기와 동일한 방식으로 퍼지화, 퍼지추론, 비퍼지화 과정을 거쳐 결정되며 퍼지 PID 제어기와 동일한 입력과 출력 소속 함수와 퍼지 규칙을 사용하였으며 비퍼지화 과정 역시 무게 중심법을 사용하여 제어를 수행하였다.

3.3 실험 결과의 분석

본 연구에서는 25°C의 외기를 43°C로 가열시키는 실험을 수행하였다. Fig. 3에서 본 바와 같이 기존 연구에서 얻은 PID 제어의 결과를 보면 적분 제어기의 사용으로 비례-미분 제어에 비해 정상상태 오차는 감소하였으나 히터 공급 전압이 요동치는 것과 같은 현상이 발생함을 알 수 있었다.

퍼지 입력과 출력 함수의 한계치 L 은 실제 제어기와 동일한 조건에서 Simulink의 Fuzzy logic toolbox를 이용한 수치 해석 과정을 통해 결정되었다. 본 연구에서는 한계치를 조절해 가면서 수치 해석 과정을 반복하여 한계치 L 이 1.0일 때의 응답 특성이 최적임을 얻었다. 한계치 L 이 일정 범위 밖으로 벗어날 경우는 설정 온도로의 제어가 수행되지 않으며 L 이 증가하면 정격 초과가 발생하며 응답 속도가 현저히 감소하였으며 반대로 L 이 감소하면 응답 속도는 증가하지만 설정 온도로의 도달 후 일정하게 유지되지 못한 채 요동치는 현상이 발생하였다. 이와 같이 충분한 반복 작업을 통해 얻어진 한계치값을 실제 시스템에 적용한 결과가 Fig. 7에 나타나 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 퍼지 PID 제어기의 응답 특성은 기존의 PID 제어기에 비하여 응답 속도를 그대로 유지하면서 급기 온도가 설정 온도 범위 내

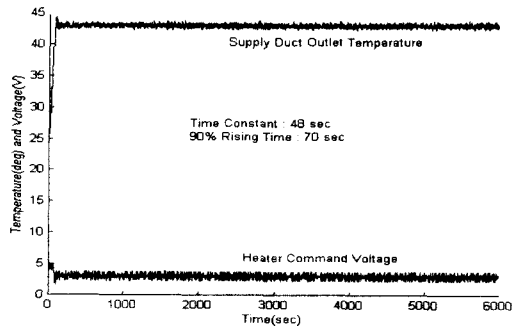


Fig. 7 System response of fuzzy PID controller when $L=1.0$.

에서 정확하게 유지됨과 동시에 히터 공급 전압도 일정하게 유지됨을 볼 수 있다. 실제 적용에서도 한계치 L 의 변화에 따라 수치 해석과 동일한 결과가 나타났다. 한계치 L 이 증가하면 설정 온도로의 상승 과정에서의 히터 공급 전압이 일정 범위 내에서 안정되게 유지되지만 설정 온도 도달 후에 최소 전압으로 빨리 하강하지 못하여 정격 초과가 발생할 수 있음이 입증되었다. 반대로 L 이 감소하면 히터 공급 전압이 큰 범위에서 요동치는 현상을 유발시켜 급기 온도 역시 불안정해지는 등 시스템의 불안정을 초래하였다. 따라서, 한계치 L 은 선택 과정에서 세심한 주의가 요구된다. 응답 특성의 비교를 위해 구성된 단순 퍼지 제어의 결과는 Fig. 8과 같이 응답 속도는 다른 제어기와 거의 동일하고 급기 온도도 설정 온도로 비교적 안정되게 유지되나 히터 공급 전압이 큰 범위 내에서 요동치며 이로 인해 급기 온도가 Fuzzy PID 제어의 결과에 비해 크게 요동치며 불안정한 것을 확인할 수 있으며 한계치 L 이 수치 해석 결과보다는 반복 실험에 의한 경험적 근거에 의하여 결정되므로 범위 설정이 매우 어렵다.

실험 결과로 보면 퍼지 제어를 사용함으로써 괄목할 만한 성능 증대 효과를 얻을 수 있었고 단순 퍼지 제어에 비해 퍼지 PID 제어가 뛰어난 응답 특성을 나타냈다.

4. 결 론

퍼지 제어는 입력과 출력과의 관계가 정량적인 분석이 어려운 시스템에 널리 이용되고 있으며

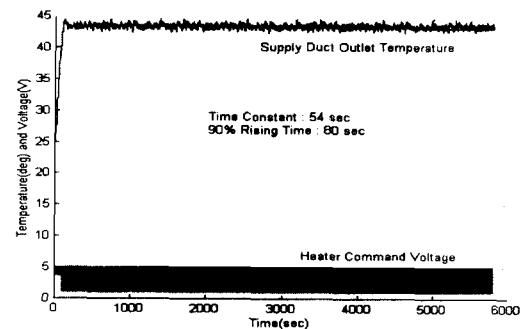


Fig. 8 System response of simple fuzzy controller when $L=1.0$.

개별 공조시스템과 같은 비선형 시스템에 효과적으로 적용될 수 있다. PID 제어에서의 미비점을 보완하고자 급기 온도 조절을 위해 퍼지 제어를 설계하고 실제 적용한 결과는 다음과 같다.

(1) 퍼지 PID 제어기는 설정 급기 온도로의 신속하고 정확한 응답 특성을 나타냄으로써 기존에 연구된 PID 제어와 단순 퍼지 제어에 비하여 괄목할 만한 성능 증대 효과를 나타냈다.

(2) 퍼지 제어는 퍼지화에 사용되는 소속 함수의 종류와 한계치의 설정에 따라 응답 특성이 크게 변할 수 있으므로 충분한 수치 해석과 반복 실험에 의한 세심한 선택이 요구된다.

(3) 단순 퍼지 논리에 의한 세 오차 신호로 구성된 단순 퍼지 제어기는 비교적 우수한 성능을 나타냈으나 히터 공급 전압이 큰 범위 내에서 요동치는 현상을 나타냄으로써 퍼지 PID 방법에 비해 시스템의 반응 특성이 불안정하다.

후 기

본 논문은 1999년도 한국과학재단 특정기초연구(1999-2-310-003-3) 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Chang, Y. J., Park, Y. C., Chung, K. S., Han, H. T. and Lee, J. J., 2001, A PID control of electric heater for PEM, Korean Journal of Air Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 13, No. 1, pp. 59-65.
2. Terano, T., Asai, K. and Sugeno, M., 1992,

- Fuzzy Systems Theory and Its Applications, 1st ed., Academic Press Inc.
3. Wang, L., 1997, A Course in Fuzzy Systems and Control, 1st ed., Prentice hall.
 4. Misir, D., Malki, H. and Chen, G., 1996, Design and analysis of a fuzzy proportional-integral-derivative controller, Fuzzy Sets and Systems, Vol. 79, pp. 297-314.
 5. Carvajal, J., Chen, G. and Ogmen, H., 2000, Fuzzy PID controller: Design, performance evaluation, and stability analysis, International Journal of Information Sciences, Vol. 123, pp. 249-270.
 6. Franklin, G., Powell, J. and Workman, M., 1997, Digital Control of Dynamic Systems, 3rd ed., Addison-Wesley.
 7. Malki, H., Li, H. and Chen, G., 1994, New design and stability analysis of fuzzy proportional-derivative control system, IEEE Transaction of Fuzzy Systems, Vol. 2, No. 4, pp. 245-254.