

Fuzzy 이론을 이용한 온도 계측제어 시스템의 구현

박정훈^{*} · 강문성^{**} · 김윤호[§] · 유광렬^{§§}

^{*}청주대학교 전자공학과 · ^{**}목원대학교 컴퓨터공학과 · [§]목원대학교 전자정보통신공학부

Implementation of Temperature Measuring & Control System Using Fuzzy Theory

Jeong-hoon Park^{*} · Moon-sung Kang^{**} · Yoon-ho Kim[§] · Kwang-ryol Ryu^{§§}

^{*}Chongju University · ^{**}Mokwon University

E-mail : jhpark@wslab.chongju.ac.kr

ABSTRACT

This paper describes the implementation of a fuzzy temperature measuring & control system to control the water temperature in plant. This system consisted of mainly three parts; sensing part, control part that includes a control algorithm introduced the fuzzy theory, and actuating part. The control algorithms of control part are utilized a look-up table method and firmware technique using one-chip microprocessor(89C52).

For evaluating the performance of a fuzzy control system, the experiment results of a fuzzy controller are compared with these of a conventional PID controller which provides an auto-tuning function. The experiment results show that the proposed controller has a good control performance and is robust to external disturbance.

1. 서 론

대부분의 산업프로세스에서 이용되는 온도 제어시스템은 고정밀도가 요구되고 있어 PI 또는 PID 제어방식이 채용되고 있다^[1]. 그러나, PID제어기는 제어대상 플랜트의 정확한 수학적모델이 없는 경우, 전문가의 경험에 의하여 P, I, D 파라미터를 설정해야 하므로 일반인들이 제어기를 조작하기에는 어려운 점들이 있다. 또한, 수학적으로 근사화된 모델을 사용하는 경우에 모델링 되지 않은 미지의 요소가 다수 존재한다. 이러한 미지 요소는 자동화 생산라인에서 불규칙적으로 발생하는 외란과 더불어 PID제어기의 성능 및 프로세스의 안정도를 악화시키는 요인이 되어 생산성 및 신뢰성의 저하를 초래하게 된다^[2,3].

그러나, 퍼지이론은 현상의 불확실한 상태를 그대로 표현해주는 방법으로 특히, 입·출력 관계의 정량적 분석이 어려운 여러가지 공정의 제어시스템에서 모델에 기준한 기준제어기의 부적합한 점을 대체하여 성공적으로 도입되고 있다^[4-6].

따라서, 본 연구에서는 프로세스 운용자의 경험적 지식 및 제어 전문가의 지식을 활용하는 Fuzzy 제어이론을 도입하여 비선형적인 동특성을 가지며, 또한 수학적 모델링이 어려운 실제의 온도제어 프로세스에 유용하게 적용할 수 있고, 미

지의 외란에 대하여 강인하고 속응성이 뛰어난 Fuzzy 온도 계측제어장치를 구현하였다.

Fuzzy 온도 계측제어 시스템은 마이크로프로세서와 주변회로를 이용하여 설계하였으며, 센서를 통해 플랜트내의 수온을 측정/저장하는 기능을 갖는 검출부, 퍼지이론을 도입하여 구현된 제어알고리즘을 포함하고 있으며 FND를 구동하는 제어부, 그리고 추론결과를 토대로 히터(Heater)의 입력량을 가변시켜 플랜트가 설정온도를 유지하도록 하는 구동부등으로 구성되었다. 제어 알고리즘은 입·출력값에 대한 정량적인 값을 구하여 룩업 테이블(look-up table)을 작성하였다.

구현된 퍼지 온도 제어시스템의 성능실험을 위하여 파라미터 자동조정(Auto-tuning)기능을 갖춘 PID제어기와 개발된 제어장치를 비교·실험하여 그 성능을 입증하였다.

II. 제어시스템 설계 및 구현

II.1. 하드웨어 설계

플랜트내의 수온을 제어하기 위한 퍼지 온도 제어시스템의 하드웨어 구성도는 아래의 그림1.과 같이 검출부, 제어부, 구동부 및 제어대상 플랜트로 구성되었고, 그림1.에서 각 부분의 구조 및 기

능은 다음과 같다.

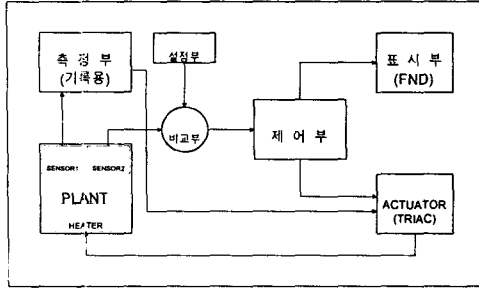


그림 1. 온도 제어시스템의 구조

- (1) 검출부(측정부) : 검출부는 플랜트내의 수온을 측정하는 부분으로 Pt-100Ω센서, 증폭기 그리고 A/D변환기로 구성된다. 검출부에서는 센서로부터 검출된 미약한 신호를 증폭회로를 통해 증폭한 다음, 이 신호를 A/D변환기(ICL7109)를 사용하여 12Bit의 분해능을 갖고 0.05℃ Scale로 -204.05℃ ~ 204.05℃의 온도범위를 측정 가능토록 설계하였고, I/O Card(8255)를 통해 PC에서 실험 데이터를 기록·보관할 수 있도록 구성하였다.
- (2) 설정부 : 플랜트의 원하는 온도를 조정하기 위하여 ±0.1℃ Scale로 가변할 수 있도록 Up Key 와 Down Key로 구성하여 큰 폭의 설정온도 변화와 작은 폭의 설정온도 변화를 유용하게 사용하기 위하여 시간지연에 따르는 Key 처리가 가능하도록 하였다.
- (3) 비교부 : 검출부로부터의 플랜트 온도 (0.05℃ Scale)와 설정부의 설정온도(0.1℃ Scale)를 비교하여 0.05℃ Scale로 최소 -6.20℃에서 최대 +6.20℃까지의 오차를 구한다.
- (4) 제어부 : 제어부로는 μ-processor(89c52)를 이용하였고 플랜트내의 수온제어를 위한 제어 알고리즘을 탑재하고 있으며, 표시부의 FND 및 Actuator를 제어한다. FND 구동은 다이나믹 방식으로서 2.5msec에 1개의 FND를 구동하여 총 6개의 FND를 1회 구동하는데 17.5msec가 소모되도록 하였다. 또한, 퍼지추론된 Look-up Table에 의한 출력변화량을 전출력량과 합산하여 0~255 사이의 이산값을 병렬로 Actuator에 출력하도록 하였다.
- (5) 표시부 : 현재온도 및 설정온도를 FND에 표시하며, 표시온도는 0.1℃까지 표시할 수 있고 범위는 0.0℃ ~ 99.9℃이다.
- (6) 구동부 : 기존의 제품들이 TPR을 구동하는 전류를 발생시키기 위한 D/A변환부로 되어 있으나 본 연구에서는 TPR기능을 D/A부에 포함시켜서 제어부(89C52)에서의 디지털 출력량으로 직접 TRIAC을 구동할 수 있도록 구성하였다. 이러한 Actuator는 μ-Processor(PIC16C54)에서 담당하며 제어부로 부터의 출력량을 8Bit 분해능으로서

TRIC을 이용하여 위상제어함으로써 Heater 입력을 0~220V로 가변시킬 수 있도록 하였다.

II.2. 제어 알고리즘 설계

온도제어를 위한 퍼지 제어알고리즘은 입력값을 받아 양자화 하는 퍼지화부, 제어규칙을 이용하여 추론하는 추론부, 추론된 값을 비퍼지화값으로 변환하는 비퍼지화부로 구성된다.

II.2.1. 퍼지화부(Fuzzification)

퍼지 제어장치를 구성하기 위해서는 먼저 입·출력변수와 제어규칙에서 사용되는 언어적 변수들의 애매함을 정량적으로 표현하기 위해 소속함수에 대한 정의가 필요하다. 본 연구에서는 입력변수로서 오차(e) 와 오차변화량(ce)을 출력변수로는 플랜트의 제어입력변화량(Δu)으로 설정하여 그림2.와 같이 입·출력변수에 대한 소속함수를 구성하였다.

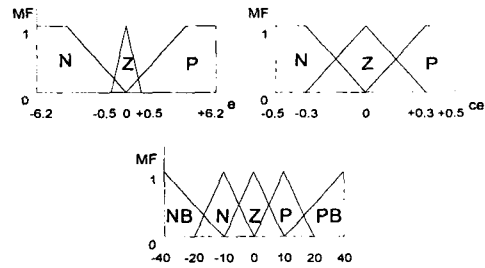


그림 2. 입·출력 변수의 소속함수

그림2.에서 오차 와 오차변화량 및 제어입력은 다음식과 같다.

$$e(k) = R(k) - Y(k) \quad (1)$$

$$ce(k) = e(k-5) - e(k-15) \quad (2)$$

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k) \quad (3)$$

여기에서, $R(k)$ 는 플랜트의 설정온도, $Y(k)$ 는 플랜트의 현재온도, $e(k)$ 는 오차, $ce(k)$ 는 오차의 변화량, $e(k-1)$ 는 한 샘플링 이전의 오차, $u(k)$ 는 제어입력, $\Delta u(k)$ 는 제어입력 변화량을 각각 나타내고, 샘플링 시간은 1초로 설정하였다. 여기에서, 오차가 $-6.2^\circ\text{C} \leq e \leq +6.2^\circ\text{C}$ 사이에 있을 때 각각 최대값과 최소값의 출력을 내도록 하였다. 그리고 오차변화량은 시스템의 지연시간을 고려하여 식(2)와 같이 계산하였다.

II.2.2. 추론부(Inference)

표1.에 퍼지제어기에서 사용된 제어규칙을 나타내었다. 여기에서, Z, P, N, PB, NB등은 언어적 변수로 각각 입·출력변수에 대한 퍼지집합을 나타내며, 추론방법으로는 E. H. Mamdani에 의해 제안된 MAX-MIN 추론법을 사용하였다. 그리고, 추론결과를 비퍼지화하기 위해 무게중심법(center

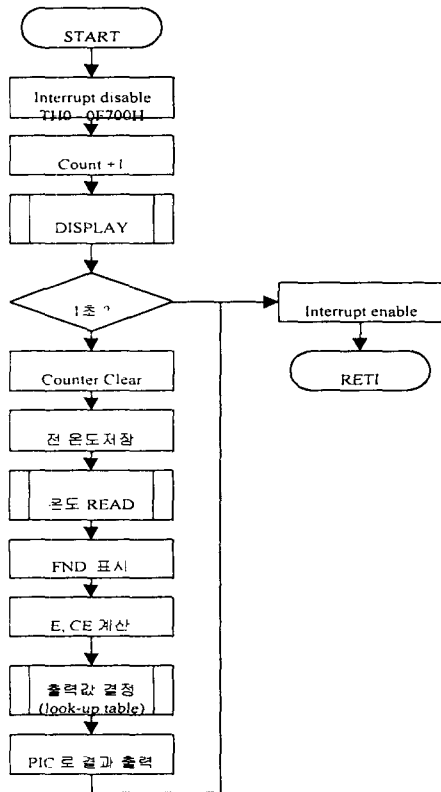
of gravity)을 사용하였다.

표 1. 제어 규칙

ce \ e	N	Z	P
N	PB	P	Z
Z	P	Z	N
P	Z	N	NR

II.2.3. 룩-업 테이블(Look-Up Table)

어떤 입력이 주어졌을 때 제어규칙에서 비퍼지화과정까지는 매우 복잡한 단계들을 거쳐야 원하는 출력값을 구할 수 있기 때문에 모든 입력을 가정하여 이들을 미리 추론하여 비퍼지화값을 구한 뒤 배열로 만들어 놓은 것을 룩-업 테이블이라 한다. 본 연구에서는 PC와 시스템을 인터페이스 시켜 PC상에서 제어 알고리즘을 C언어로 프로그래밍 하여 실험을 통해 만족할 만한 제어성능을 구한 후, 이를 토대로 입력에 대한 추론값을 구하여 룩-업 테이블을 작성하였다. 그림3.에 구현된 제어 알고리즘의 펌웨어(firmware) 흐름도를 나타내었다.



III. 실험 및 고찰

퍼지 온도 제어시스템의 실험은 먼저 제어부 프로세서(89c52)에 탑재할 룩-업 테이블 작성 및 제어 알고리즘의 성능 실험을 위하여, 퍼지 이론을 도입한 제어 알고리즘을 프로그래밍 및 디버깅이 용이한 C언어로 구현하고, PC와 제어대상 플랜트를 8255 I/O카드를 사용하여 인터페이스 시켜 그림 4.와 같이 온도제어시스템을 구성하였다.

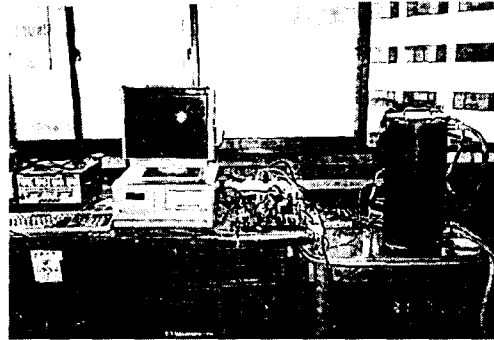


그림 4. 퍼지 온도 제어시스템

PC를 이용한 실험은 구현된 제어 알고리즘의 성능이 만족할 만한 결과를 보일 때까지 실험을 반복하면서 소속함수 및 제어규칙에 대한 튜닝을 계속하였다. 또한, PC를 이용하여 실험한 결과가 우수한 성능을 보였을 때, 입·출력값에 대한 정량적인 값을 구하여 룩-업 테이블을 작성한 후 마이크로프로세서에 탑재하여 그림5.와 같은 퍼지 제어장치를 구현하였다.

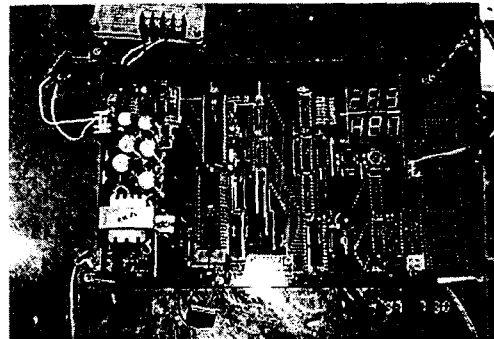


그림 5. 구현된 퍼지 온도 제어장치

실험을 위해 제작된 제어대상 플랜트의 사양은 표2.에 나타내었다.

표 2. 플랜트의 사양

부분품명	크기 및 재질
탱크의 크기	$\pi \times (0.21)^2 \times 0.45$ (원통형)
탱크의 재질	2mm 철판
Heater 용량	1.5kW/220V, 2kW/220V
온도입력기	Pt-100Ω 2개

개발된 퍼지제어장치의 성능실험을 위하여 플랜트내의 물의 온도가 설정값에 얼마나 빨리 도달하고 설정된 값을 정확하게 유지하는가 하는 수온의 추종특성과 외란을 가했을 때 온도변화 특성을 관측하였으며, 그 결과를 계수 자동조정 (Auto-tuning)기능을 갖춘 PID제어기를 채용한 경우와 비교하였다.

먼저, 1.5kW용량의 히터를 사용하여 플랜트에 13ℓ의 물을 붓고 가열하여 설정온도를 60℃에서 90℃까지 15℃씩 가변 시키면서 플랜트내의 수온이 설정온도를 추종하기까지의 동특성을 관측하였다.

그림6은 P, I, D 계수조정이 완료된 PID제어기를 채용한 경우와 퍼지제어기를 채용한 경우 수온의 추종특성을 나타내었다. 그림6에서 PID제어기를 채용한 경우는 최대오버슈트가 각각 1.50℃, 0.65℃, 0.60℃로 나타났고, 퍼지제어기를 채용한 경우에는 2.0℃, 1.2℃, 0.9℃를 보였으며, 정상상태에서는 퍼지제어기를 채용한 경우가 PID제어기를 채용한 경우보다 더 정확하게 설정온도를 추종하는 것을 알 수 있다.

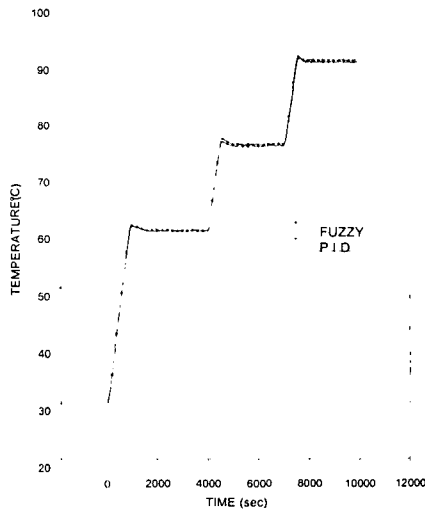


그림 6. 설정온도 변화시 수온의 추종특성

또한, 외란 실험을 위해 13ℓ의 물이 담긴 플랜트에 설정값을 60℃로 하고 물의 온도가 정상상태에 도달했을 때 22℃의 냉수 2ℓ를 첨가한 경우의 추종특성을 그림7에 나타내었다. 그림7에서 PID제어기를 채용한 경우의 실험에서는 실험시작과 동시에 자동으로 계수 조절을 수행하도록 하였다. 그림에서 나타난 바와 같이, 조정이 완료되기 전의 추종특성은 퍼지제어기 보다 좋지 않으며, 조정이 완료되어 설정온도를 정확하게 추종하기까지는 많은 시간이 필요함을 알 수 있다. 또한, 정상상태에서 외란을 첨가한 후 다시 정상상태가 되기까지의 시간을 측정된 결과, PID제어기를 채용한 경우와 퍼지제어기를 채용한 경우 각각 1760초와 1280초로 나타났다. 이는 퍼지제어기가 PID제어기보다 외란에 강인함을 보여주는 것이다.

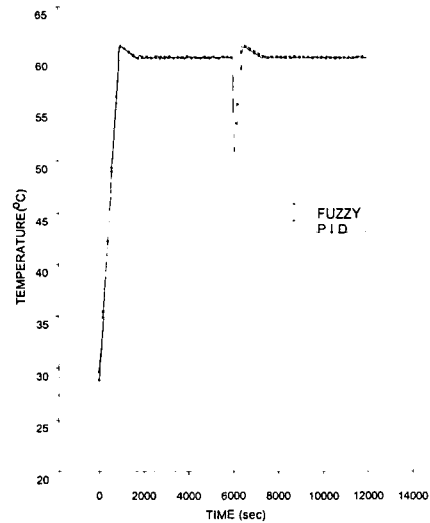


그림 7. 외란 첨가시 수온의 추종특성

그림8은 앞의 실험에서 설정된 PID제어기 계수를 그대로 사용하고 히터(Heater)용량을 1.5kW에서 2kW로 변화시켜 실험한 결과와 퍼지제어기를 채용하여 실험한 결과이다.

두 결과를 비교하면, PID제어기를 채용한 경우가 퍼지제어기를 채용한 경우보다 정상상태에서 크게 진동하는 것으로 나타나, 퍼지제어기가 제어 환경 변화시 더 정확하게 설정값을 추종하는 것을 알 수 있다. 즉, PID제어기의 경우는 P, I, D 계수를 재설정하여야 동특성 개선이 가능함을 알 수 있다.

지금까지의 실험결과를 종합해 보면, PID제어기의 계수 설정이 여러가지 요인으로 인하여 미흡하거나 진행중인 경우 일정시간 동안의 과도응답 특성을 측정된 후 계수설정을 하게 되므로, 측정기간 동안의 과도응답 특성이 악화될 수 있

며, 또한 대상 플랜트의 응답형태에 따라 각각의 계수 설정방법이 적용가능 또는 불가능한 제약점을 가지고 있다. 이에 비하면 본 연구에서 개발한 퍼지제어기의 경우에는 사용상에 제약점이 없을 뿐 아니라 과도응답 특성에 대한 사전측정이 필요없어 과도응답 특성이 악화될 염려가 없다. 또한 외란이나 제어환경 변화에도 강인함을 알 수 있었다.

하는 단점을 보완할 수 있기 때문에, 고정밀도를 요구하는 산업프로세스에서 기존의 PID제어기를 대체하여 다양한 분야에서의 활용 및 응용이 가능할 것으로 기대된다.

본 연구는 한국과학재단의 지원에 의하여 청주대학교 정보통신연구센터(ICRC) 주관으로 수행되었음

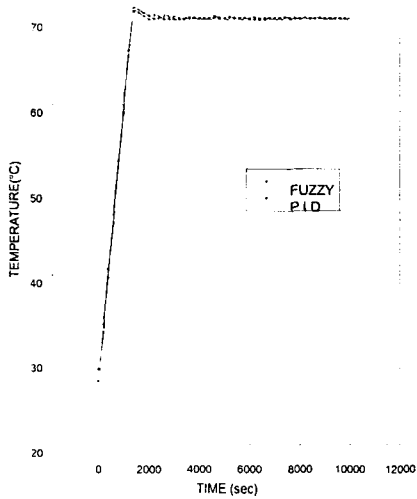


그림 8. 제어환경 변화시 수온의 추종특성

참 고 문 헌

1. 주해로, 김교형, "전자식 열펌프와 마이크로 컴퓨터를 이용한 정밀온도제어시스템 개발에 관한 연구", 과학기술처 연구보고서, pp10-18, 1986.
2. 업상회, 장용훈 외, "신경회로망의 예측제어를 이용한 보일러 온도제어에 관한 연구", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp625-627, 1994
3. 서강면, 박상선, 강문성, "온도제어를 위한 퍼지제어기의 설계 및 구현", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp 659-661, 1997.
4. Jang MJ, Chen CI, "Fuzzy successive modelling and control for time delay system", International Journal of System Science, Vol.27, No.12, pp1483-1490, 1996.
5. Kosko. B. "Neural Network and Fuzzy System", Prentice Hall, pp45-62, 1991.
6. 이영노, 김태완, 서일홍, "록업 테이블을 이용한 자동학습 퍼지제어기의 설계", 전자공학회 논문집, 제 29권, B편 9호, pp 723-734, 1992.

IV. 결 론

퍼지이론을 도입하여 비선형적인 동특성을 가지며, 수학적 모델링이 어려운 실제의 온도제어 프로세스에 유용하게 적용할 수 있고, 외란에 대하여 강인하고 속응성이 뛰어난 퍼지 온도 제어장치를 구현하였다.

퍼지 온도 제어장치는 마이크로프로세서와 주변회로를 이용하여 설계하였고, 검출부, 제어부, 구동부 등으로 구성되었다. 제어 알고리즘은 입·출력값에 대한 정량적인 값을 구하여 look-up 테이블을 작성하였고 원칩 마이크로 프로세서(89C52)에 탑재하였다.

구현된 제어장치의 성능검증을 위해, 수온의 추종특성과 외란에 대한 실험을 통하여 계수 자동조정(Auto-tuning) 기능을 갖는 PID제어기와 그 성능을 비교하였다.

퍼지 온도 제어장치는 기존 PID제어기와 비교해 볼 때, 언어적 제어변수를 사용므로 설계 및 구현이 용이하고, 전문가가 아니더라도 조작하기 쉽다는 장점을 가지며, PID제어기가 갖는 단점인 설정값을 변화시킬 때마다 파라미터를 조정해야