

솔더링 시스템의 온도 제어를 위한 퍼지 PI 제어기 설계

오갑석¹, 강근택^{2*}

¹동명대학교 자동차공학과, ²부경대학교 전자공학과

Design of Fuzzy PI Controllers for the Temperature Control of Soldering Systems

Kabsuk Oh¹, Geuntaek Kang^{2*}

¹Department of Automotive Engineering, TongMyong University

²Department of Electronics Engineering, Pukyong National University

요약 본 연구는 솔더링 시스템에서 세라믹 인두기의 온도 제어를 위한 제어기 설계 알고리즘을 제안하고, 제어 실험으로 그 유효성을 보였다. 솔더링 시스템의 세라믹 인두기 온도 응답 특성이 매우 느리며 제어 입력에 비선형인 특성을 갖고 있어 정밀한 모델링과 제어기 설계에 어렵다. 본 연구에서는 전제부 변수가 제어 입력이고 결론부가 전달함수인 퍼지 규칙들로 구성된 TSK 퍼지 모델로 세라믹 인두기 온도 특성을 표현하였다. 퍼지 모델 결론부의 전달함수는 계단 입력 응답으로부터 구한다. 세라믹 인두기 온도 응답 특성이 매우 느리므로 완전한 계단 입력 응답을 구하기가 어렵다. 불완전한 계단 입력 응답으로 전달함수를 구하는 방법으로 유전적 알고리즘(GA)을 사용하는 것을 제안하며, 예제로 제안한 그 유효성을 보였다. 또한 TSK 퍼지 모델로부터 퍼지 제어기를 설계하는 방법도 제안하며 그 유효성을 예제 시뮬레이션으로 확인하였다. 제안한 방법들을 세라믹 인두기 온도 제어에 적용하여 실험 하였다. 퍼지 모델의 규칙은 7개로 구성되었으며 퍼지 제어기의 결론부는 PI 제어기로 하였다. 제안한 퍼지 제어기의 실험 결과는 선형 제어기보다 우수하였으며 퍼지 PID 제어기를 사용한 기존 연구 결과에 못지않았다.

Abstract This paper proposes controller design algorithms for a ceramic soldering iron temperature control system, and reports their effectiveness in a control experiment. Because the responses of the ceramic soldering iron temperature to the control input are non-linear and very slow, precise modeling and controller design is difficult. In this study, the temperature characteristics of a ceramic soldering iron are represented by TSK fuzzy models consisting of TSK fuzzy rules. In the fuzzy rules, the premise variable is the control input and the consequences are the transfer functions. The transfer functions in the fuzzy model were obtained from the step input responses. As the responses of the ceramic soldering iron temperature are very slow, it is difficult to obtain the complete step input responses. This paper proposes a genetic algorithm to obtain the transfer functions from an incomplete step input responses, and showed its effectiveness in examples. This paper also reports a fuzzy controller design method from the TSK fuzzy model and examples. The proposed methods were applied to the temperature control experiments of ceramic iron. The TSK fuzzy model consisted of 7 TSK fuzzy rules, and the consequences were PI controllers. The experimental results of the proposed fuzzy PI controller were superior to the linear controller and were as good as in previous studies using a fuzzy PID controller.

Keywords : Fuzzy System, Nonlinear System, Soldering system, Genetic Algorithm

본 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2015년)에 의하여 연구되었음.

*Corresponding Author : Geuntaek Kang(Pukyong Univ.)

Tel: +82-51-629-6215 email: gtkang@pknu.ac.kr

Received December 7, 2015

Revised (1st January 14, 2016, 2nd February 1, 2016, 3rd February 3, 2016)

Accepted February 4, 2016

Published February 29, 2016

1. 서론

본 연구에서는 솔더링 시스템에서 온도 제어를 위한 비선형 PI 제어기 설계 알고리즘을 제안하고, 실제 시스템에서 적용하여 그 유효성을 보인다.

전자부품들이 갈수록 소형화, 박판화 되어감에 따라 PCB에 장착되는 부품도 소형화되고 IC 등의 고기능성 칩으로 바뀌고 있다. 이에 따라 PCB상에 장착되는 소형 부품의 조립 또는 수리를 위해 사용되는 장비의 성능 개선에 관한 연구도 활발히 진행되고 있다[1-3]. 이에 본 연구에서는 온도 센서가 있어 온도 제어가 가능한 디지털 인두기에, 정밀한 온도 제어가 가능한 제어 시스템을 설계하고자 한다.

솔더링 시스템은 히터 시스템으로 제어 입력 값에 따라 시스템의 동특성이 다르게 나타나는 비선형의 특성도 갖고 있다. 이러한 비선형 특성들을 갖고 있는 솔더링 시스템의 원활한 온도 제어를 위하여 여러 연구가 제안되었다[4-7]. 하지만 솔더링 시스템의 제어 입력에 비선형인 특성을 충분히 반영한 제어기 연구는 되지 않고 있다.

이에 본 연구에서는 제어 입력에 비선형인 시스템의 제어기를 설계하는 알고리즘을 제안하고 그 알고리즘을 솔더링 시스템의 온도 제어에 적용하는 실험을 한다. 제어기 형태는 거의 모든 산업 현장에서 사용되고 있는 PID 제어기를 사용하며, 비선형 특성을 반영하기 위해 퍼지 시스템을 이용한다. 퍼지와 PID를 결합한 연구는 많이 있지만[8-10], 제어 입력에 비선형인 시스템의 제어에 관한 연구는 없다.

시스템의 제어기 설계를 위해 먼저 그 시스템의 모델을 구해야 한다. 본 연구에서는 비선형 시스템 표현에 뛰어난 TSK 퍼지 모델[11]을 사용한다. 퍼지 모델의 전제부는 제어 입력이 되며, 결론부는 계단 응답을 이용하여 구한 선형 모델이다. 시스템이 제어 입력에 비선형이므로 여러 제어 입력 값에 대한 계단 응답들을 구한다. 계단 응답으로 결론부 선형 모델을 만들 때 최적화 수법인 GA(genetic algorithm)를 이용한다. 퍼지 제어기는 퍼지 모델과 같은 TSK 퍼지 규칙들로 구성되며, 퍼지 제어기 결론부는 퍼지 모델 결론부의 선형 시스템에서 구해지는 PI 제어기이다. 제안한 퍼지 PI 제어기의 성능 실험에서 기존 선형 PI 제어기보다 뛰어난 제어 결과를 보여준다.

2. 솔더링 스테이션

본 연구에서 제어 대상인 솔더링 시스템은 문헌[7]에서 사용한 시스템으로 Fig. 1과 같다. 그림에서 점선 부분의 인두기 히터가 제어 대상이다. 아날로그 입력 채널을 통해 제어용 스위치로부터 설정 온도 값을 입력받고 K형 온도 센서로부터 현재 온도를 입력받아 제안하는 제어 방법으로 제어 입력 값을 구하고, 출력포트를 통하여 트라이악의 게이트 트리거 신호로 제어하도록 설계하였다.

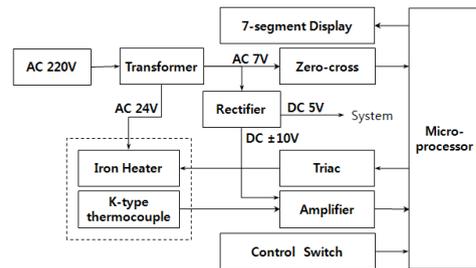


Fig. 1. Schematic diagram of soldering station

산업 현장에서 많이 사용되는 인두기는 니크롬과 세라믹 등이 있다. 본 연구에서는 세라믹 인두기의 제어기를 설계하고자 한다.

문헌[7]에서는 본 연구의 대상인 솔더링 시스템 인두기의 온도 제어를 위하여 PID 제어기의 설계 방법을 제안하였다. 문헌[7]에서 제안한 PID 제어기 설계 방법은, 먼저 인두기의 계단 응답 실험에서 얻은 입출력 데이터로 오차 최소화법으로 선형 모델을 만든다. 그리고 그 선형 모델의 역함수를 제어기로 하여 규범 모델을 따라 가도록 하는 제어 시뮬레이션을 하고, 그 시뮬레이션에서 얻은 데이터로 오차 최소화법으로 PID 계수를 구하는 방법이다. 이 방법은 PID 제어기 파라미터를 체계적으로 구할 수 있는 장점이 있다. 그러나 시스템이 선형이고 입출력 데이터를 충분히 구할 수 있는 경우에만 사용이 가능하다.

본 연구의 대상인 세라믹 인두기는 히터에 가해지는 전압 값에 따라 온도 응답 특성이 다르게 나타나는 비선형 특성을 가지고 있으므로 일반적인 선형 제어기로는 충분한 제어 결과를 얻기 어렵다. 또한 온도 응답 특성이 특히 매우 느리고 시간 상수가 매우 크므로 인두기 히터의 충분한 입출력 데이터를 구하기가 어려워 동적 모델

을 구하기도 쉽지 않다.

따라서 본 연구에서는 제어 입력에 비선형인 특성과 시간 상수가 매우 큰 특성을 함께 갖는 시스템의 제어기 설계 알고리즘을 제안하고 세라믹 인두기에 적용한 제어 실험을 한다.

3. 퍼지 제어기 설계 알고리즘

인두기 특성인 제어 입력에 비선형인 시스템의 퍼지 제어 시스템을 구축하는 알고리즘을 제안한다. 먼저 대상 시스템을 TSK 퍼지 규칙들로 구성된 비선형 모델을 GA를 이용하여 만들고, 그 모델로부터 마찬가지로 TSK 퍼지 규칙들로 구성된 비선형 퍼지 제어기를 설계한다. 시스템이 제어 입력에 비선형이므로 퍼지 규칙들의 전체 부 변수는 제어 입력이다.

3.1 GA를 이용한 퍼지 모델링

본 연구에서 사용하는 퍼지 모델은 식(1)과 같은 TSK 퍼지 규칙들로 구성된다.

$$\text{If } u(t) \text{ is } F^i \text{ then } G_P^i(s) \quad (1)$$

여기서 $u(t)$ 는 제어 입력, F^i 는 퍼지 집합 그리고 $G_P^i(s)$ 는 규칙 전체부에서 정해지는 영역에서 시스템의 동역학을 표현하는 전달함수이다. 퍼지 집합 F^i 는 Fig. 2과 같이 삼각형 형태이다.

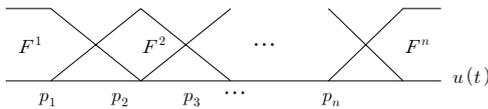


Fig. 2. Fuzzy sets used in fuzzy rules

Fig. 2에서 어느 한 $u(t)$ 값에서 모든 규칙들의 적합도의 합은 항상 1이 됨을 알 수 있다. 즉 퍼지 집합 F^i 에서 $u(t)$ 의 멤버쉽 값을 $F^i(u(t))$, 규칙의 개수를 r 이라 하면 항상 $\sum_{i=1}^r F^i(u(t)) = 1$ 이다.

따라서 식 (1)의 퍼지 모델로부터 출력 y 는 식 (2)와 같이 구한다.

$$y(t) = \sum_{i=1}^r F^i(u(t))y^i(t) \quad (2)$$

여기서 y^i 는 $G_P^i(s)$ 에서 구해지는 출력 값이다.

$G_P(s)$ 는 식 (3)과 같은 2차 시스템으로 한다.

$$G_P(s) = \frac{K}{(1+sT_1)(1+sT_2)} e^{-sL} \quad (3)$$

각 규칙에서 결론부 전달함수 $G_P^i(s)$ 는 시스템의 계단입력 응답을 이용하여 구한다. 즉, i 번째 규칙의 경우 제어입력 값을 Fig. 2의 p_i 로 했을 때 시스템의 계단 입력 응답을 이용하여 구한다.

본 연구에서 식 (1)과 같은 퍼지 규칙을 만들기 위해서는 여러 제어 입력 값에 대한 계단 입력 응답을 구하여야 한다. 그런데 제어 입력 값이 클 경우 계단 입력 응답 출력 값이 측정 가능한 범위를 벗어나는 경우가 있다. 또는 시스템에 적분 특성이 있거나 시간 상수(time constant)가 매우 긴 경우 open loop에서 정상 상태까지 도달하기가 어렵다. 이러한 경우들에서는 충분한 계단 입력 응답을 얻지 못한다.

시스템의 계단 응답으로 모델링 하는 방법은 많이 발표되어 있다[12]. 문헌[12]에서 사용하는 방법들은, gain K 와 지연 시간 L 은 시간 응답 그래프에서 구하고, 시간 상수 T_1, T_2 는 계단 응답의 33%와 67% 되는 곳에서 출력 값이 일치하도록 구한다. 또 다른 방법은 전달함수 Nyquist 곡선의 제3사분면이 일치하도록 최소자승 최적화 수법을 이용하여 구한다. 이와 같은 방법들은, 정상 상태까지 도달한 계단 응답을 구할 수 있어야 하며, 그래프를 이용할 경우 정확도가 떨어진다.

본 연구에서는 정상 상태까지 도달하지 않은 계단 입력 응답으로부터 전달함수 $G_P(s)$ 를 구하기 위하여 최적화 수법인 GA(유전적 알고리즘)를 이용한다.

계단 응답 실험에서 얻은 측정 데이터와 GA를 이용하여 4개의 파라미터 K, T_1, T_2, L 을 구한다.

식 (3)의 출력 $y_P(t)$ 는 다음 식 (4)와 같다.

$$y_P(t) = K \left(1 + \frac{T_2 e^{-(t-L)/T_2} - T_1 e^{-(t-L)/T_1}}{T_1 - T_2} \right) \quad (4)$$

GA에서 사용하는 목적함수로는 식 (5)의 MSE를 사용하였다.

$$MSE = \sum_{i=1}^N [y(t_i) - y_p(t_i)]^2 / N \quad (5)$$

여기서 $y(t_i)$ 는 시간 t_i 때 관측된 출력 값, $y_p(t_i)$ 는 식 (4) 모델의 출력이다.

GA에서 목적함수 MSE 값이 최소 되는 파라미터 값을 구한다. 한 개의 파라미터를 8bit로 표현하여 염색체 총 길이를 32bit로 하였고, 집단 크기는 500개로 하였다. 한 세대에서, 5 쌍의 염색체를 교배시키고, 5 개의 염색체를 돌연변이 시켰으며, 하위 20%는 도태시키고 무작위로 구한 새로운 염색체로 교체하였다. 1000 세대까지 진화 시켰다. 500 세대 이후에서는 수렴을 촉진시키기 위하여, 하위 20%를 도태시킨 후 새로 만들어지는 염색체는 세대가 진행 할수록 점점 최상위 염색체에 닮아가는 형태가 되도록 하였다.

다음 예제 1과 2는 정상 상태까지 도달한 계단 응답을 얻을 수 없는 경우, 즉 계단 응답에서 정상 상태에 도달하기 전의 데이터만으로 GA를 이용하여 식 (3) 형태의 전달함수 $G_p(s)$ 를 구하는 예제이다.

예제 1 : 차수가 모델과 같은 2차 시스템의 모델링을 하였다. 모델링 대상은 식 (6)과 같다.

$$G(s) = \frac{5}{s^2 + 5s + 5} \quad (6)$$

Fig. 3의 실선이 식 (6) 시스템의 단위 계단 응답이다. 모델링에서는 단위 계단 응답에서 정상 상태 출력 값의 50%까지 데이터만 구할 수 있다고 가정하여 시간 0.9까지 데이터를 이용하여 구해진 모델이 식 (7)이다. Fig. 3에서 점선이 식 (7) 모델의 응답이며 실제 출력과 모델 출력의 차이가 거의 없다. 모델의 차수가 실제 시스템 차수와 같은 경우, 정상 상태 출력의 50%까지 데이터만으로도 충분히 모델링됨을 볼 수 있다.

$$G_p(s) = \frac{0.997}{(1+0.278s)(1+0.718s)} \quad (7)$$

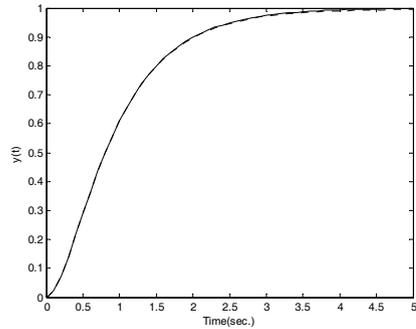


Fig. 3. Step responses of Eq.(6) and Eq.(7)

예제 2: 모델의 차수 보다 높은 차수인 3차 시스템을 모델링 하였다. 모델링 대상은 식 (8)과 같으며, Fig. 4에서 실선이 단위 계단 응답이다.

$$G(s) = \frac{6}{s^3 + 6s^2 + 11s + 6} \quad (8)$$

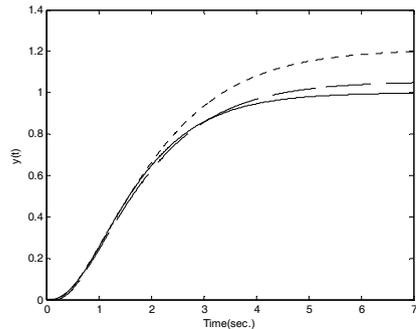


Fig. 4. Step responses of Eq.(8), Eq.(9) and Eq.(10)

모델링에서는 예제 1과 같이 단위 계단 응답을 정상 상태 출력 값의 50%까지만 구할 수 있다고 가정하였다. 즉 시간 [0 1.58] 구간의 데이터만을 이용하여 GA를 이용하여 모델을 구하였으며, 구한 모델은 식 (9)이며 그 모델의 응답은 Fig. 4에서 점선 부분이다.

$$G_p(s) = \frac{1.21}{(1+0.986s)(1+1.045s)} e^{-0.138s} \quad (9)$$

식 (9)의 모델의 DC gain이 1.21이므로 정상 상태에서 오차가 크게 나온다. 모델의 DC gain이 실제보다 크게 나오는 것은 정상 상태 출력 값의 50%까지 데이터만으로 모델링하므로 0에 가까운 매우 낮은 출력도 모델링에 강조가 되기 때문이다. 따라서 모델링에서 0에 가까운 초기부분의 데이터는 빼고 정상 상태 출력 값의 20%

~ 50% 데이터 즉 시간 [0.88 1.58]구간의 데이터를 사용하여 모델을 만들었다. 그 결과 식 (10)과 같은 모델이 만들어졌으며 그 모델의 응답은 Fig. 4에서 파선으로 표현하였다.

$$G_{PI}(s) = \frac{1.054}{(1+0.749s)(1+1.085s)} e^{-0.183s} \quad (10)$$

위의 예제에서 알 수 있듯이, 실제 시스템의 차수가 모델의 차수보다 클 경우에는, 초기부분의 데이터는 모델링에 사용하지 않는 것이 좋은 결과가 나온다. 실제 시스템이 모델보다 차수가 큰 지를 판단하는 기준은 모델의 지연시간을 보면 된다. 실제 시스템에서는 지연 시간이 없는데 모델에서 지연시간이 나올 경우 실제 시스템의 차수가 모델보다 큰 경우이다.

3.2 퍼지 제어기 설계

시스템이 식 (1)과 같은 퍼지 규칙들로 구성된 퍼지 모델로 표현 되었을 경우 퍼지 제어기는 식 (11)과 같은 퍼지 규칙들로 구성된다.

$$\text{If } u(t) \text{ is } F^i \text{ then } u^i(t) = g_c^i(t) \quad (11)$$

여기서 $g_c^i(t)$ 는 퍼지 모델의 규칙 식 (1)의 $G_p^i(s)$ 로부터 구해지는 제어기이다. 식 (11) 퍼지 제어기의 전체부는 퍼지 모델의 전체부와 동일하다. 식 (11)의 퍼지 제어기로부터 제어 입력 $u(t)$ 는 다음 식 (12)과 같이 구해진다.

$$u(t) = \sum_{i=1}^n F^i(u(t))u^i(t) \quad (12)$$

다음 예제 3에서 제어 입력에 비선형인 시스템의 퍼지 제어기 설계를 보여준다.

예제 3 : 제어 대상 프로세스가 식 (13)과 같이 제어 입력 $u(t)$ 에 비선형인 시스템이다.

$$y''(t) + y'(t) + u(t)y(t) = 2u^2(t) \quad (13)$$

제어 입력 범위를 [0 2.2]로 하였을 때 식 (13)의 퍼지 모델은 식(14)와 같다

$$\begin{aligned} \text{If } u(t) \text{ is } F^1 \text{ then } G_p^1(s) &= \frac{0.4}{s^2 + s + 0.2} \\ \text{If } u(t) \text{ is } F^2 \text{ then } G_p^2(s) &= \frac{1}{s^2 + s + 0.5} \\ \text{If } u(t) \text{ is } F^3 \text{ then } G_p^3(s) &= \frac{2}{s^2 + s + 1} \\ \text{If } u(t) \text{ is } F^4 \text{ then } G_p^4(s) &= \frac{4}{s^2 + s + 2} \end{aligned} \quad (14)$$

식 (14)의 퍼지 집합들은 Fig. 5와 같다.

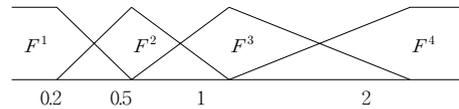


Fig. 5. Fuzzy sets used in Eq. (14) and Eq. (15)

식 (14) 퍼지 모델로부터 설계된 퍼지 PI 제어기는 식 (15)와 같다. 식 (15) 제어기 규칙 결론부의 PI 제어기는 식 (14) 모델 규칙 결론부의 선형 모델로부터 만들어진 것이다. PI 제어기 설계 때 설계 기준은 목표치 도달 시간을 3초로 하고 overshoot가 최소가 되도록 하였다.

$$\begin{aligned} \text{If } u(t) \text{ is } F^1 \text{ then } G_C^1(s) &= 1.5 + 0.28/s \\ \text{If } u(t) \text{ is } F^2 \text{ then } G_C^2(s) &= 0.5 + 0.26/s \\ \text{If } u(t) \text{ is } F^3 \text{ then } G_C^3(s) &= 0.1 + 0.25/s \\ \text{If } u(t) \text{ is } F^4 \text{ then } G_C^4(s) &= 0.005 + 0.25/s \end{aligned} \quad (15)$$

출력의 설정 값을 $r(t) = 1, 2, 3, 4$ 로 하였을 때, 식 (15) 퍼지 제어기로 제어하는 시뮬레이션을 하였으며 그 결과는 Fig. 6에서 실선과 같다.

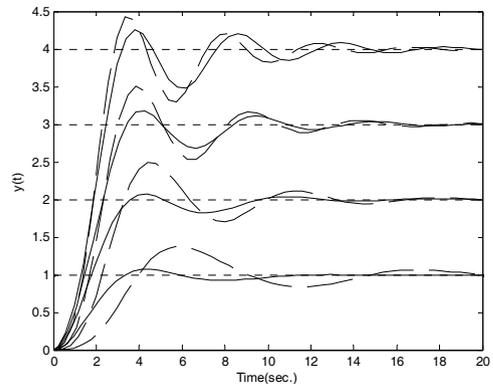


Fig. 6. The reponses using the fuzzy PI controller Eq. (14) and linear PI controller.

선형 PI 제어기와 비교하기 위하여 식 (15)의 3번째 규칙 결론부 $G_c(s) = 0.1 + 0.25/s$ 만을 이용한 제어 시뮬레이션을 하였으며 그 결과는 Fig. 6에서 파선과 같다. Fig. 6에서 제어 결과를 비교하면, 최대 %overshoot 값이 퍼지 PI 제어기의 결과가 선형 PI 제어기에 비해 훨씬 낮음을 알 수 있다.

4. 인두기의 제어기

앞에서 제안한 퍼지 제어기 살계 알고리즘을 이용하여 솔더링 스테이션에서 인두기 히터의 온도 제어를 위한 퍼지 PI 제어기를 설계를 하고 그 성능을 확인하였다.

4.1 인두기의 퍼지 모델링

인두기 히터에 공급되는 24V/60Hz의 교류 전원은 트라이악의 게이트 트리거 포인트에 의해 제어된다. 이를 위해 정현파 전원의 반주기 구간을 100 포인트로 등분하고 트라이악의 도통 특성으로 5포인트에서 85포인트 구간을 제어 대상으로 한다. 따라서 인두기 히터의 제어 입력 $u(t)$ 는 트리거 포인트 값이며 출력 $y(t)$ 는 인두기 온도이다.

모델링을 위하여 제어입력 $u(t)$ 값을 15포인트에서 10포인트씩 증가하며 75포인트까지 7개의 계단 입력에 대한 응답 실험을 하였다. 그 결과는 Fig. 7에서 실선과 같다. Fig. 7에서 맨 위의 그래프가 $u(t) = 75$ 일 때 응답이며 맨 아래 그래프는 $u(t) = 15$ 일 때 그래프이다.

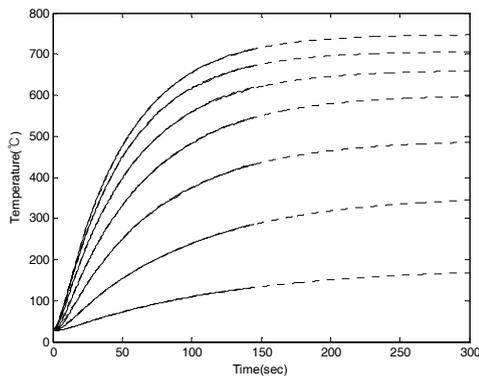


Fig. 7. The step reponses of heater temperature

인두기 온도를 표현하는 퍼지 모델을 만들기 위해서

는 Fig. 7에서 실선으로 표현되는 7개의 실험 데이터를 이용하여 7개의 식 (3)과 같은 전달함수를 구해야 한다. 계단 응답을 이용한 모델링의 통상 수법들은 문헌 [12]에 설명되어 있으며 그 방법들을 이용하기 위해서는 계단 응답 실험 결과가 정상 상태까지 충분히 있을 경우 사용할 수 있다. 그러나 세라믹 인두기의 경우 Fig. 7에서와 같이, 제어 입력 $u(t)$ 값이 작을 경우는 시간 상수 값이 매우 커 정상 상태까지 실험 데이터를 구하기 어려우며 $u(t)$ 값이 클 경우에는 인두기 온도가 사용 범위를 넘어가며 측정이 어렵다. 따라서 세라믹 인두기의 경우 실험에서 정상 상태까지 데이터를 얻을 수 없어 문헌 [12]의 방법을 사용할 수 없고 본 연구에서 제안하는 GA를 이용한 방법을 이용 한다.

각 계단 입력 응답에서 얻은 데이터와, 3.1절에서 설명한 GA를 이용한 모델링 수법으로 7개의 선형 모델을 만들었다. 그 모델들은 식 (3)에서 지연시간이 없는 ($L=0$) 2차 시스템이다. 그 선형 모델을 이용하여 식 (16)과 같은 퍼지 규칙 7 개로 구성된 퍼지 모델을 만들었다.

$$\text{If } u(t) \text{ is } F^i \text{ then } G_p^i(s) = \frac{K^i}{(1+sT_1^i)(1+sT_2^i)} \tag{16}$$

여기서, 퍼지 집합 F^i 는 Fig. 8과 같으며 파라미터 K^i , T_1^i , T_2^i 는 Table 1과 같다.

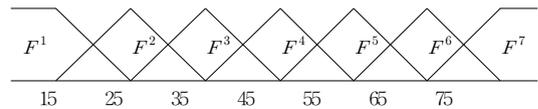


Fig. 8. Fuzzy sets used in Eq. (16) and Eq. (17)

식 (16) 퍼지 모델의 계단 응답 시뮬레이션을 600초 동안 하였다. 시뮬레이션에서 제어 입력 값은 모델 작성 때에 사용한 값과 같은 것을 적용하였다. 그 결과는 Fig. 7에서 점선과 같다. 실제 출력이 있는 구간에서 모델의 출력이 실제 출력과 거의 오차 없이 일치함을 볼 수 있다.

Table 1. The parameters of Eq. (16) Fuzzy Model and Eq. (17) Fuzzy PI Controller

Fuzzy Set	Fuzzy Model			Fuzzy Controller	
	T_1^i	T_2^i	K^i	K_P^i	K_I^i
F^1	8.235	120.588	10.344	0.27	0.003
F^2	6.275	90.980	13.241	0.24	0.005
F^3	5.294	68.235	13.295	0.24	0.006
F^4	4.314	60.392	12.776	0.25	0.007
F^5	3.530	52.941	11.536	0.26	0.007
F^6	3.922	47.451	10.443	0.27	0.008
F^7	4.314	46.667	9.602	0.30	0.009

4.2 인두기의 PI 퍼지 제어기 설계 및 실험

본 연구에서는 퍼지 규칙 결론부가 PI 제어기로 하여 식 (17)과 같은 퍼지 규칙이 7개인 퍼지 PI 제어기를 만들었다. 결론부의 7개 PI 제어기 설계 때 기준은, 제어기 출력인 제어입력 $u(t)$ 값이 구간 [5 85]을 벗어나지 않으면서 %overshoot가 5% 이내이고 상승 시간이 최소화 되도록 하였다.

If $u(t)$ is F^i then (17)

$$u^i(t) = K_P^i e(t) + K_I^i \int e(\tau) d\tau$$

여기서 파라미터 K_P^i 와 K_I^i 값들은 Table 1과 같다. 식 (17)에서 퍼지 집합들은 식 (16)의 것과 동일하다.

식 (17) 퍼지 규칙들로 구성된 퍼지 PI 제어기를 이용하여 제어 실험을 하였다. 실험에서 설정 온도는 200°C, 250°C, 300°C 및 350°C로 하였으며 그 결과는 Fig. 9에서 실선과 같다.

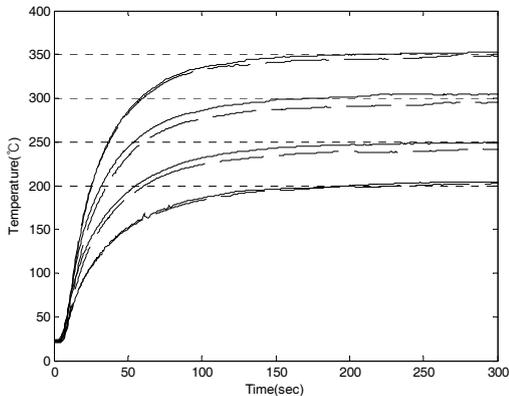


Fig. 9. The reponses using the fuzzy PI controller Eq. (17) and linear PI controller Eq. (19).

제안한 퍼지 제어기 성능의 비교를 위하여 선형 PI 제어기를 구하였다. 선형 PI 제어기를 구하기 위하여 사용된 선형 모델은 제어 입력 값이 중간 값인 $u(t) = 45$ 일 때 계단 응답으로 구한 식 (18)이며, 그 선형 모델로부터 설계된 선형 PI 제어기는 식 (19)와 같다. 제어기 설계 때 기준은 퍼지 제어기 설계 때와 같다.

$$G_P(s) = \frac{12.8}{(1 + 4.3s)(1 + 60.4s)} \tag{18}$$

$$G_c(s) = 0.25 + \frac{0.007}{s} \tag{19}$$

식 (19)의 선형 PI 제어기를 이용한 제어 시뮬레이션 결과는 Fig. 9에서 파선과 같다. 퍼지와 선형 제어기 성능을 비교하기 위하여 2개의 성능 지수를 구하였다. 하나는 출력 값이 설정 값의 90%까지 도달하는 상승 시간 t_r 이며, 또 하나는 90%에 도달한 시간 t_r 에서 시간 $t = 300\text{sec}$.까지 오차 제곱의 평균값으로 식 (20)과 같이 구하였다.

$$MSE = \sum_{t=t_r}^{300} [y(t) - r]^2 / N \tag{20}$$

여기서 $y(t)$ 는 제어 결과 출력 값, r 은 설정 온도 값이다. 그 결과는 Table 2와 같다.

Table 2. Performance Comparison

Reference r	t_r (sec.)		MSE	
	Fuzzy	Linear	Fuzzy	Linear
200°C	86	92	37.08	37.81
250°C	86	103	58.36	162.24
300°C	72	85	67.67	138.39
350°C	71	73	75.85	101.55
Average	78.75	88.25	59.74	110.25

Table 2에서 설정 온도 값이 200°C 인 경우에는 두 제어기의 제어 결과가 비슷하지만, 그 외 설정 온도 값에서는 제안한 퍼지 PI 제어기의 제어 결과가 선형 PI 제어기에 비해 뛰어난을 알 수 있다.

문헌 [7]에서는 니크롬과 세라믹 2 종류의 인두기 온도 제어를 위한 퍼지 PID 제어기 설계 실험을 하였다. 문헌 [7]에서 사용된 퍼지 모델은, 제어 입력 값을 전 구

간에서 랜덤하게 값을 변화 시키면서 충분한 출력 응답의 실험 데이터가 있을 경우 정확한 모델을 얻을 수 있다. 그러나 문헌 [7]에서는 계단 응답의 데이터만으로 모델을 만들어 제어기를 설계하였다. 니크롬 인두기의 경우 응답이 빠르므로 좋은 제어 결과가 얻었으나 세라믹 인두기의 경우 응답이 매우 길어 충분한 응답을 얻지 못하여 모델이 부정확하여 제어 결과가 세라믹에 비해 미흡하다. 또한 문헌 [7]의 퍼지모델 결론부 선형식은 모델 전체를 한 개의 선형식으로 표현하고 최소자승법으로 계수를 구한 것이므로, 각 규칙 결론부 선형식은 그 규칙 전체부가 지정하는 구간에서 시스템 동특성을 표현하는 것이라고 말할 수 없으며 제어기 파라미터 조정도 어렵다. 그에 반해 본 연구에서 사용하는 퍼지 모델은 결론부가 전달 함수로 되어 있어 제어기 파라미터 조정이 용이하고, GA를 이용하여 전달함수 파라미터를 구하므로 정상 상태까지 도달하지 않은 실험 데이터로도 구할 수 있다. 세라믹 인두기 제어에 PI 제어기를 사용한 본 연구의 실험 결과는 더 복잡한 PID 제어기를 사용한 문헌 [7]의 결과에 못지않음을 그림에서 알 수 있다.

5. 결론

본 연구는 제어 입력에 비선형인 특성을 갖고 있는 솔더링 시스템 인두기의 온도 제어를 위한 제어기 설계 알고리즘을 제안하였다.

정상 상태까지 도달하지 않은 계단 응답으로 GA를 이용하여 선형 모델을 구하는 방법을 제안하였으며, 시스템 차수가 모델 차수보다 높은 경우는 초기의 데이터는 모델링에 제외시키는 방법을 이용하여 모델링 오차를 줄일 수 있었다. 제안한 GA를 이용한 모델링 기법으로 제어 입력에 비선형인 시스템을 TSK 퍼지 모델로 표현할 수 있었으며, 그 퍼지 모델 결론부를 제어기로 바꾸어 퍼지 제어기를 만들었다.

제안한 방법을 인두기 온도 제어기에 설계에 적용하여 실험한 결과, 제안한 퍼지 PI 제어기는 통상 PI 제어기에 비해 출력 설정 값에 관계없이 고루 뛰어난 제어 결과를 보였다.

References

- [1] H. Nishikawa, T. Takemoto, T. Uetani, "Damage Control of Soldering Iron Tip for Lead-free Solder", *Joining of Advanced and Specialty Material*, pp. 163-167, 2005.
- [2] Gilbert, M. James, Dabestani, Zaif "Laser Soldering Control Using Optical Imaging", *Journal of the SMART*, Vol. 18 No. 4, pp. 3- 11, 2006.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1108/09540910610717857>
- [3] Y. K. An, D. H. Yoon "Design and Fabrication of the Digital Iron Using the Micro-processor", *Journal of the Institute of Electronics Engineers of Korea SC*, Vol. 38, No. 5 pp. 33-41, 2001.
- [4] H. Hamane, K. Hirano, K. Kase, K. Miyazaki, "Industrial Temperature PID Cotroller for Pb-Free soldering Iron", *Proc. of the 17th IFAC World Congress*, pp. 10838-10843, 2008.
- [5] K. S. Oh "Development of Digital Solder Station Based on PID Controller", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 11, No. 3 pp. 866-872, 2010.
- [6] K. Oh, G. Kang, "Temperature control of the Rework-system using fuzzy PID controller", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 15, No. 10 pp. 6289-6295, 2014
- [7] K. S. Oh, "A soldering station controller for two types heater", *Journal of the Korean Society for Power System Engineering*, Vol. 19, No. 3 pp. 48-54, 2015.
DOI: <http://dx.doi.org/10.9726/kspse.2015.19.3.048>
- [8] Y. S. Kim, C. G. Lee, "The Design of Auto Tuning Neuro-Fuzzy PID Controller Based Neural Network", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 7, No. 5 pp. 830-836, 2006.
- [9] Y. S. Kim, C. G. Lee, "The Design of Auto Tuning Neuro-Fuzzy PID Controller Based Neural Network", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 7, No. 5 pp. 830-836, 2006.
- [10] G. Kang, K. Oh, "Design of Fuzzy PID controllers using TSK Fuzzy Systems", *International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems*, Vol. 24, No. 11, pp.102-109, 2014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5391/jkiis.2014.24.1.102>
- [11] M. Sugeno, G. Kang, "Structure Identification of Fuzzy Model", *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 28, No.1, pp. 15-33, 1988.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0165-0114\(88\)90113-3](http://dx.doi.org/10.1016/0165-0114(88)90113-3)
- [12] Åström Karl J., Hägglund T. *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*. p.11-24, Instrument Society of America, 1995.

오 갑 석(Kabsuk Oh)

[종신회원]



- 1989년 2월 : 부경대학교 전자통신 공학과 공학사
- 1998년 9월 : 동경공업대학 종합이 공학연구과 공학박사
- 1998년 3월 ~ 2006년 2월 : 동명 대학 조교수
- 2006년 2월 ~ 현재 : 동명대학교 자동차공학과 부교수

<관심분야>

소프트컴퓨팅, 자동제어, 인공지능

강 근 택(Geuntaek Kang)

[정회원]



- 1976년 2월 : 서울대학교 응용물리 학과 공학사
- 1987년 3월 : 동경공업대학 시스템 과학전공 공학박사
- 1987년 3월 ~ 현재 : 부경대학교 전자공학과 교수

<관심분야>

퍼지 및 지능 시스템