전자부품용 저항용접기의 퍼지-PID 이득조정 알고리즘

Fuzzy-PID Gain Scheduling Algorithm of Resistive Welder for Electronic Parts

Park Myung Kwan, Lee Jong Woon

Abstract - The temperature profile control issue in the resistive welder for the electronic parts is discussed. The average current of the welder tip depends on the phase(on-time) of the AC power and the tip temperature maintains or increases/decreases depending on the integral of the current square and heat loss, The basic PID control algorithm with thermo-couple feedback is difficult to track the temperature profile for various parts and optimal gain changes much. So constant gain PID algorithm is not enough to cover various electronic parts welding and a Fuzzy-PID automatic gain tuning algorithm is devised and added to conventional PID algorithm and this hybrid control architecture is implemented and the experimental results are shown.

Key Words : 저항용접기, 온도제어, 퍼지-PID, 이득조정

1. 서론

현재 전자부품과 코일 및 커넥터 조립 시, 납땜을 이용한 조립공정은 환경문제와 생산성의 문제를 안고 있다. 특히 유럽에서는 환경문제로 납 없이(lead-free) 제조할 것을 요구하고 있는바, 자동생산 시스템으로의 전환이 가능하고 친환경 제조기술로 전환이 요구되고 있는데, 이에 적당한 것이 저항용접기이다. 용접시간과 온도의 제어가 가능한 일반적인 저항용접기의 제어는 220V교류신호의 zero crossing 점을 기준으로 SCR의 시작점(turn on)을 조절하여, 교류신호의 위상을 제어한다.[1]

온도 profile제어의 핵심은 위상제어를 위한 RTC(Real Time Clock)을 제어 하는 부분이다. RTC의 제어는 용접기 헤드의 열전대의 신호를 받아 PID제어를 하도록 구성되어있다. 교류신호의 위상에 따라 실제 출력 전류가 공급되는 시간폭이 정해지고, 정해진 전류의 양에 따라 용접기 팁에 가열되는 온도가 유지 또는 상승하게 되는 것이다.[2]

기존의 저항용접기의 구조는 일반 AC전원을 변압기를 통하여 낮은 일정 전압을 제공하며, 용접Tip에 전류를 공급하여 용접을 수행하는 것으로 열전대를 통해 온도를 궤환하여 시분할을 제어함으로서 공급전류를 제어하도록 하는 방식이다. 또 고전적인 PID제어기를 적용하여 실험에 의해 각종 Gain을 설정함으로서 Tip의 저항 값과 모양이 바뀌거나할 경우에는 다시 Gain을 설정해야한다. 이 경우 온도제어에 있어 발생되는 time-delay에 의한 설정온도 추종이 매우 어렵게 되어 용접 품질을 떨어뜨리게 되는 요인이 된다.

저자 소개
* 正 會 員 : 동양대학교 IT전자공학부 교수.工博
** 正 會 員 : 동양대학교 IT전자공학부 교수.工博

시스템의 모델을 볼 때 시분할과 발생되는 전류 그리고 Tip에서 발생되는 열의 관련성이 매우 비선형적으로 동작하기 때문에 고전적인 PID제어기를 적용하여 제어기를 구성할 경우 추종성에 대한 문제가 있기 때문에 본 연구에서는 이러한 문제점을 보완하기 위하여 실험을 통하여 시간분할과 발생되는 전류 그리고 tip에서 발생되는 열의 관련성을 도출하기 위하여 기존의 고전적인 PID제어기를 통하여 실험한 결과를 바탕으로 Knowledge-based system을 통하여 고전적인 제어의 문제점을 해결하도록 한다.

2. Fuzzy Gain Scheduling PID 제어

퍼지제어기의 경우 Knowledge-based system중에 제어 경험을 전문가적인 언어로서 fuzzy rule로 만들어 제어하는 것이다. 이 knowledge base는 추론 mechanism과 함께 제어대상의 상태의 knowledge와 결합되어 제어량을 결정하게 된다. 특히 본 연구에서는 fuzzy logic을 적용함으로서 on-line으로 error와 error의 변화율에 의해 PID gain을 결정하도록 하는 nonlinear PID Controller의 구조를 갖도록 구성하여 용접기 온도제어의 time-delay문제와 용접조건에 변화에 적응할 수 있도록 구성하였다

용접기에 팁 온도를 제어하기 위해 PID 제어를 사용했는데 이산 등가 식은 다음과 같다.

$$u(k) = K_p e(k) + K_i T_s \sum_{i=1}^{n} e(i) + \frac{K_d}{T_s} \Delta e(k) \quad (1)$$

먼저 용접 온도조건에 따라 K_p, K_i, K_d gain을 조정하여 용접조건별로 가장 적합한 gain을 추출하는 실험을 하였다. 실제 제어되는 heating 온도/heating 시간은 사용자의 설정에 의해서 결정되어지나, 본 연구의 적용대상인 LCD Panel FPCB용 용접에 맞춰 실험을 수행 하였다.

여기서 사용자에 의해서 설정되어지는 원하는 온도 profile(T_{dp})은 1차 상승온도 및 상승시간 , 1차 유지시간, 2차 상승온도 및 상승시간, 2차 유지시간으로 구성되어 있다. 먼저 고전적인 PID제어기를 적용하여 각각의 T_{dp}에 적절한 제어 parameter를 찾아내고, 순시적으로 PID gain의 조정이 가능한 퍼지 로직을 적용해 K_p, K_i, K_d의 PID gain parameter 값을 조정할 수 있도록 하는 시스템을 적용하였다.[3]

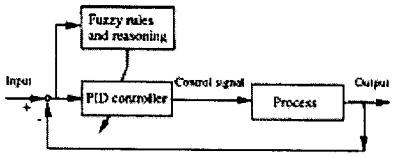

그림1. 퍼지이득 조정기를 갖는 PID제어기

그림1 은 퍼지 이득 조정기를 갖는 PID 제어 시스템을 보여준다. 퍼지 규칙은 오차와 오차의 변화율을 입력으로 한다. 두 개의 퍼지 입력 값으로부터 비례 이득 값 K_p와 미분 이득 값 K_d는 쉽게 결정할 수 있으나, 오차의 적분에 대한 이득 값을 나타내는 적분 이득 값은 정하기가 어렵다. 그래서 비례 이득 값과 미분 이득 값은 오차와 오차의 변화율에 따라 적절한 값으로 결정되지만 실험에 의해 적분 이득 값 K_i는 K_p와 K_d 값에 대해 조정되도록 한다. K_p와 K_d이득 값은 각각 미리 정한 범위 즉, $[K_{p,min}, K_{p,max}]$와 $[K_{d,min}, K_{d,max}]$내에 존재하며, 적절한 범위는 실험적으로 결정될 수 있다. 적절한 범위는 실험을 통해 결정하였다. 위의 구조에서 PID 파라미터들은 현재 오차 e(k)와 오차 변화량 △e(k)로부터 결정될 수 있다. 게인 값 K'_p와 K'_d는 다음과 같은 퍼지 규칙 형태의 집합에 의해 결정된다.

$$\text{if } e(k) \text{ is } A_i \text{ and } \Delta e(k) \text{ is } B_i, \text{ then } K'_p \text{ is } C_i \text{ and } K'_d \text{ is } D_i, \text{ and } \alpha \text{ is } \alpha_i,\ i=1,2,3,\cdots,m. \quad (2)$$

A_i, B_i는 입력에 대한 퍼지 집합이고, C_i, D_i는 출력에 대한 퍼지 집합이다. 현재 오차 e(k)와 오차 변화량 △e(k)에 대한 이들 퍼지 규칙들의 소속 함수(membership function)은 다음과 같다.

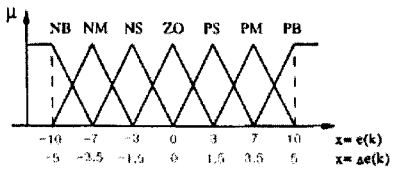

그림 2. 오차와 오차변화량의 소속 함수

그림3.은 출력 소속 함수를 나타내며, 퍼지 집합 C_i와 D_i는 Big과 Small로 특성화 된다. 여기서 소속 함수 u의 기울기와 변수 x와의 관계는 다음과 같다.

$$X_{small}(u) = e^{-3.5u} \text{ for } small \quad (3a)$$
$$X_{big}(u) = 1 - e^{-3.5u} \text{ for } big \quad (3b)$$

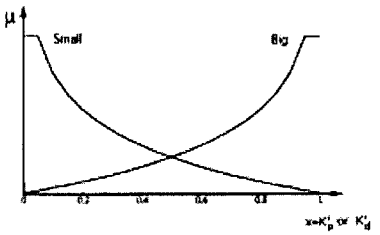

그림3. Kp′과 Kd′의소속 함수

본 연구에서는 계단 응답에 대해 실험적으로 퍼지 규칙을 표1 과 표2로 유도하였다.

		△e(k)						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
e(k)	NB	B	B	B	B	B	B	B
	NM	B	S	S	B	B	B	B
	NS	B	S	S	B	B	B	B
	ZO	B	B	B	S	B	B	B
	PS	B	B	B	B	B	B	B
	PM	B	B	B	B	B	B	B
	PB	B	B	B	B	B	B	B

표 1. Fuzzy Tuning Rules for K'_p

		△e(k)						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
e(k)	NB	B	B	B	B	S	S	S
	NM	B	B	B	B	S	S	S
	NS	B	B	B	B	S	S	S
	ZO	B	B	B	B	B	B	B
	PS	B	B	B	B	B	B	B
	PM	B	B	B	B	B	B	B
	PB	B	B	B	B	B	B	B

표2. Fuzzy Tuning Rules for K'_d

퍼지 규칙에서 i번째 규칙의 진리 값(truth value)은 전건부(antecedent part)의 소속 함수 값의 내적(product)에 의해 얻을 수 있다.

$$\mu_i = \mu_{A_i}[e(k)] \cdot \mu_{B_i}[\Delta e(k)] \quad (4)$$

여기서μ_{Ai} 는 주어진 e(k)에 대한 퍼지 집합 A_i의 소속 함수 값이고, μ_{Bi}는 주어진△e(k)에 대한 퍼지 집합 B_i의 소속 함수 값이다. 퍼지 규칙의 추론 과정은 다음과 같다.

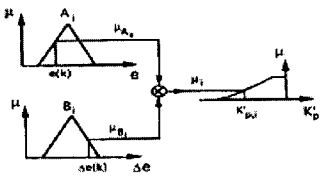

그림 4. 퍼지규칙의 추론과정

실제 시스템에서의 제어 입력은 퍼지량이 아닌 일정한 값(crisp value)이므로 비퍼지화 과정이 필요하다. 비퍼지화 방법으로는 면적 중심법(center of area method)를 사용했으며 제어기의 출력은 다음과 같다.

$$K'_p = \frac{\sum_{i=1}^{m} \mu_i K_{p,i}}{\sum_{i=1}^{m} \mu_i} \quad (5), \quad K'_d = \frac{\sum_{i=1}^{m} \mu_i K_{d,i}}{\sum_{i=1}^{m} \mu_i} \quad (6)$$

여기서 $K'_{p,i}$ 는 i번째 규칙에 해당하는 기울기 μ_i에 해당하는 K'_p의 값이다. $K'_{d,i}$는 똑같은 방법으로 구할 수 있다. 일단 K'_p와 K'_d가 구해지면 PID 제어기의 파라미터들은 다음과 같은 식으로부터 계산된다.

$$K_p = (K_{p,\max} - K_{p,\min}) K'_p + K_{p,\min} \quad (7a)$$
$$K_d = (K_{d,\max} - K_{d,\min}) K'_d + K_{d,\min} \quad (7b)$$
$$K_i = K_p^2 / \alpha K_d \quad (7c)$$

그리고 각 구간 별로 K_p와 K_d의 이득 값의 범위 [K_{p_max}, K_{p_min}]와 [K_{d_max}, K_{d_min}]를 각각 적용하였다.

3. 저항 용접기 실험 및 고찰

저항용접기의 실험은 3가지 desired temperature profile에서 고정 PID gain을 적용했을 경우에 추종에 문제점을 확인하고 이를 바탕으로 Fuzzy-PID gain scheduling알고리즘을 적용했을 때 3가지 profile을 추종함을 보임으로서 제안한 알고리즘의 유용성을 입증하도록 한다. 먼저 고정 PID gain을 K_p = 0.600 K_i =0.005 K_d =0.200로 설정하여 3가지 desired temperature profile에서의 결과는 그림5와 같다.

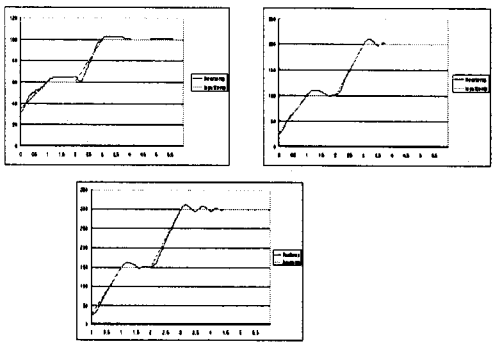

그림5. 3가지 temperature profile에서의 고정PID제어 결과

그림6은 desired temperature profile이 1차 상승온도가 60도 2차 상승온도가 100도인 경우의 실험에서 고정PID제어의 경우보다 추종을 잘하는 것을 볼 수 있으며, 이득의 변화도 볼 수 있다.

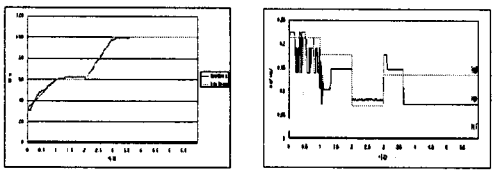

그림6. 퍼지이득조정 알고리즘 적용시(60도,100도)

그림7은 desired temperature profile이 1차 상승온도가 100도 2차 상승온도가 200도인 경우의 실험에서 고정PID제어의 경우보다 추종을 잘하는 것을 볼 수 있으며, 이득의 변화도 볼 수 있다.

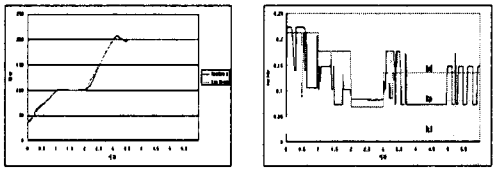

그림7. 퍼지이득조정 알고리즘 적용시(100도,200도)

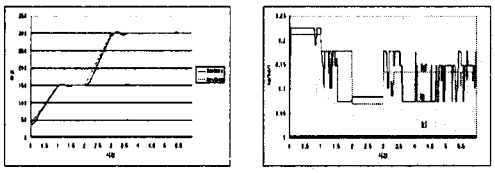

그림8. 퍼지이득조정 알고리즘 적용시(150도,300도)

그림8은 desired temperature profile이 1차 상승온도가 150도 2차 상승온도가 300도인 경우의 실험에서 고정PID제어의 경우보다 추종을 잘하는 것을 볼 수 있으며, 이득의 변화도 볼 수 있다. 그림9는 제작된 저항용접기를 보여주고 있다.

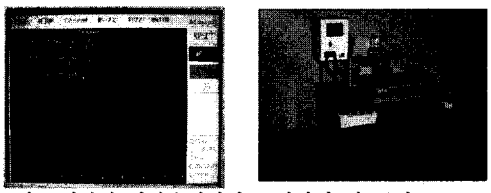

그림9. 제작된 저항용접기의 표시장치 및 구성

4. 결론

본 연구에서는 기존 저항 용접기에서의 고전적인 PID제어기의 문제점인 Tip이나 용접재료가 바뀌거나할 경우에 Gain을 조정해야하는 문제점을 fuzzy logic을 적용하여 on-line으로 error와 error의 변화율에 의해 PID gain을 결정하도록 하는 Fuzzy-PID gain scheduling알고리즘 구조를 갖도록 구성하여 용접기 온도제어의 time-delay문제와 용접조건에 변화에 적응성을 개선하여 좋은 온도프로파일제어성능을 낼수 있음을 보였다.

본 연구는 부분적으로 중소기업청에서 시행하는 2003년도 중소기업기술혁신개발사업의 결과임을 밝힙니다.

참 고 문 헌

[1] www.sungwan.co.kr/heater_data/heater1_data_k.htm
[2] "저항용접의 기초기술" 태성전자
[3] Zhen-Yu Zhao, Masayoshi Tomizuka "Fuzzy Gain Scheduling of PID Controller", IEEE Trans. on System, Man, and Cybernetics, vol. 23, no. 5, pp. 1392-1398, Sep/Oct. 1993.