

퍼지제어를 이용한 용접선 추적용 아크센서에 관한 연구

조 시 훈* · 김 재 응**

A Study on Arc Sensor for Weld Seam Tracking by Using Fuzzy Control

S. H. Cho* and J. W. Kim**

Key Words : Arc Sensor(아크센서), Weld Seam Tracking(용접선 추적), GMAW(가스 메탈 아크 용접), Moving Average Method(이동평균법), Fuzzy Control(퍼지제어), Butt-joint(맞대기 용접선)

Abstract

Experimental models which are able to determine the deviation between weld line and weaving center by measuring the weld current during welding were proposed for the gas metal arc welding process. The models were used for developing a weld seam tracking system which controls the weaving speed of a welding torch. However, it was revealed that the tracking result of the system is affected by the welding conditions. Thus an arc sensor system was developed by using fuzzy control approach for overcoming the difficulty of modelling the nonlinear process. The rule base and parameters of the fuzzy control system were determined on the basis of the results of experiments. This fuzzy control system has shown the successful tracking capability for the wide operating range of welding conditions.

1. 서 론

최근 전자기술의 급속한 발전과 아울러 용접공정의

자동화 및 제어기술이 발전을 거듭하고 있다. 각종 센서들과 제어용 소프트웨어, 산업용로봇 및 자동화 장치들이 지속적으로 개발되고 있으며 보다 지능화 되고 있다. 특히 용접선의 자동추적은 아크용접공정의 자동화에 있어서 큰 비중을 차지하고 있기

* 정희원, 영남대학교 기계설계공학과

** 정희원, 영남대학교 기계공학과

때문에 여러가지 용접선 추적용 센서의 개발 및 적용에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다¹⁾. 용접선 추적용 센서는 용접토치와 용접할 부분의 상대적인 위치를 측정하는 것으로 크게 접촉식과 비접촉식으로 나눌 수 있다²⁾. 이중 비접촉식은 시스템의 유연성과 감지정보가 다양하다는 장점을 가지고 있어 근래 개발되고 있는 센서의 주종을 이루고 있으며, 대표적으로 광학센서를 이용하는 방법과 아크센서를 이용하는 방법이 있다.

아크센서는 용접시의 전압 또는 전류신호를 이용하여 용접선을 추적하는 것으로 용접토치에 부착되는 별도의 감지장치가 필요없고 주요기능이 아크의 특성을 이용하는 소프트웨어로 이루어져 제작비가 저렴하다. 그리고 신호의 측정위치가 용접위치와 동일하다는 장점이 있다. 그러나 용접토치가 반드시 위빙을 하여야 하므로 박판금속의 용접에는 적용이 곤란하며, 전기적인 노이즈의 영향으로 아크센서의 정밀도가 낮아지기 쉽고 용접조건의 변화에 따라 아크신호의 특성이 변한다는 단점이 있다. GMAW (Gas Metal Arc Welding)는 정전압 특성을 가진 용접기를 사용하므로 팁-모재간 거리가 길어지면 전류는 감소하고 짧아지면 전류는 증가하게 된다^{3,4)}. 이것이 아크센서의 원리이며, 아크센서의 성능을 개선하기 위해서는 토치의 위빙중심선과 용접선과의 거리에 따른 용접전류의 변화량을 정확히 예측하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 토치의 위빙중심선과 용접선과의 거리에 따른 용접전류변화량의 관계를 나타내는 실험식을 도출하였다. 모델링을 위한 측정전류신호는 저역통과필터(low pass filter)에서 나오는 전류신호와 이 전류신호의 요동(fluctuation)을 줄이기 위해 디지털필터(digital filter)의 효과를 가지는 이동평균법(moving average method)을 적용한 신호를 이용하였다. 이렇게 만들어진 아크센서의 모델을 이용해 각각의 용접조건에 대해 용접선 추적실험을 하였다.

실험결과 모델이 용접조건에 따라 비선형적인 변화를 나타내었으며, 변화된 용접조건에 대해 양호한 추적성능을 얻을 수 없었다. 따라서 모델링의 문제점을 극복하고 넓은 용접조건에 적용할 수 있는 제어기를 구축하기 위해 퍼지제어(fuzzy control)를 이용하였다. 퍼지제어기의 각각의 요소(factor)를 변화시키며 용접선 추적실험을 하여 본 시스템에 적합한 퍼지제어기를 만들었다. 이렇게 설계된 퍼지제

어기를 이용하여 용접선 추적실험을 수행한 결과 본 퍼지시스템이 여러 용접조건에서 양호한 용접선 추적성능을 나타내었다.

2. 아크센서의 모델링

2.1 실험적 모델링

용접중의 아크전류는 팁-모재간의 거리가 멀어질수록 전류는 작게 흐르며, 가까워 질수록 많이 흐른다. 이러한 성질은 용접기의 정전압 특성에 기인하며, 비록 용접 와이어의 재질에 따라 달라지기는 하지만 팁-모재간의 거리와 용접전류와의 관계는 반비례의 관계가 있다. 아크센서란 아크전류를 측정하여 팁-모재간 거리를 산출해 낼 수 있는 것으로써 아크전류의 측정장치를 말한다. 용접전류가 흐를 때의 용접저항은 팁-모재간의 저항이 가장 크며, 이는 다시 용접와이어의 돌출길이에서 나타나는 저항과, 아크 자체의 저항으로 나뉘어 진다⁵⁾. 용접기의 정전압 특성으로 아크저항은 항상 일정하게 제어되므로, 용접전류는 팁으로부터 돌출되어 나온 용접 와이어의 저항에 따라 좌우된다. 따라서 팁-모재간의 거리가 멀어질수록 용접와이어의 저항으로 인하여 전류는 감소하게 된다. 이러한 관계는 전류를 측정하여 팁-모재간 거리 또는 용접부형상을 산출해 낼 수 있음을 의미하게 된다.⁶⁾ 그러므로 아크센서를 모델링하므로써 토치가 용접선 중심에서 벗어난 정도를 예측하고 이를 제어하므로써 용접선 추적에 이용할 수 있게 된다. 즉, Fig.1에서 처럼 토치가 용접선 중심에서 벗어난 채 위빙할 경우 위빙 양끝단에서 전류차 $\Delta I (=I_R - I_L)$ 가 생기게 되고, 이 ΔI 값을 이용해서 토치가 용접선 중심에서 벗어난 정도를 알 수 있으며 이 거리를 보상에 주므로써 용접선을 추적하게 된다. 아크센서를 이용해 용접선을 추적하는 데 있어 필요한 전류값은 위빙 양끝단의 전류값이 된다.

지금까지 아크센서를 이용한 용접선 추적에 있어 위빙중심이 용접선에서 벗어난 정도를 예측하기 위해 평판용접(bead on plate)에 의해 유도된 팁-모재간 거리와 전류의 관계식을 이용하였다. 그러나 이러한 관계식은 위빙시 팁-모재간 거리가 변하는 용접공정에서 위빙중심의 벗어난 정도를 예측하는데 있어 한계가 있다. 그러므로 본 연구에서는 Fig.2에서 보듯이 V홈을 가진 맞대기용접선(butt joint)에

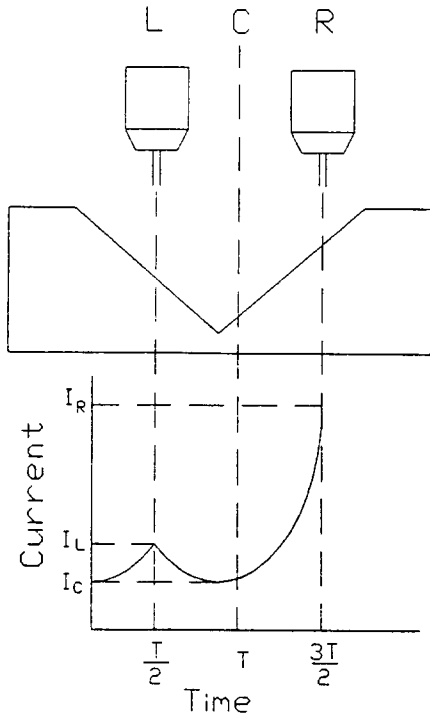


Fig. 1 Welding current variation during torch weaving

대해 토치의 위빙중심을 각각 0, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3mm 우측으로 이동한 상태에서 용접했을 경우, 위빙 양끝단에서의 전류값의 차(ΔI)를 측정하였다. 실험에서 보호가스는 혼합가스(80%Ar+20%CO₂)를 사용했으며, 용접조건은 글로블러 금속이행(grobular

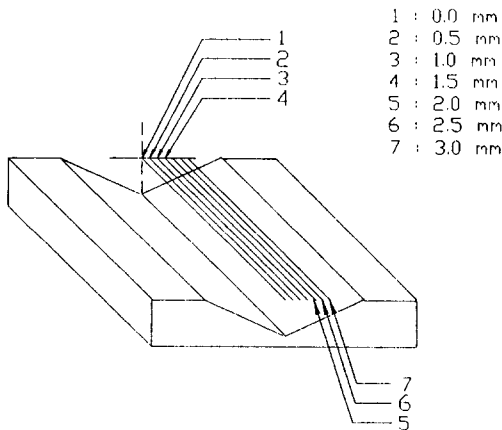


Fig. 2 Schematic diagram of weaving center deviation from weld line(offset distance)

metal transfer)을 취하기 위해 200A 30V, 220A 32V, 240A 33V의 3가지 조건을 적용하였으며⁷⁾, 용접길이 130mm인 용접물을 각 조건에 대해 3회씩 용접하였다.

2.2 모델링 결과

위빙중심이 용접선에서 벗어남에 따라 측정된 전류차(ΔI)는 다음과 같다. Fig.3은 240A, 33V의 조건에 대해 저역통과필터를 통과한 신호(filtered signal)의 ΔI 를 나타낸다. 여기서의 ΔI 는 길이 130mm의 용접선을 모두 용접했을 때 양끝단 전류차들의 평균값을 나타낸다. 그리고 직선은 이들 ΔI 값의 최소자승법을 이용한 회귀직선을 나타낸 것이다.

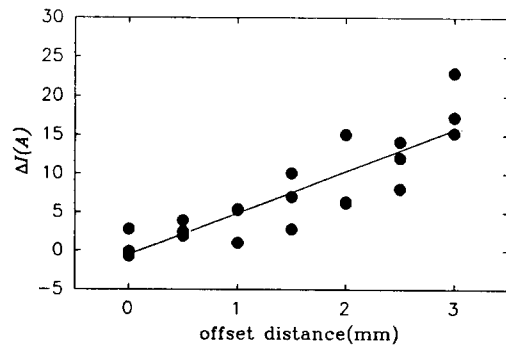


Fig. 3 Arc sensor model of filtered signal at 240A, 33V

그림으로부터 측정된 데이터들의 분산치가 매우 큰 것을 볼 수 있는데, 이것은 용접전류가 보호가스의 유량, 불규칙한 스파터(splatter)와 금속이행(metal transfer)등에 민감한 영향을 받음으로 인해 매우 심한 요동을 일으키기 때문이라 생각된다⁷⁾. 또한 용접선 중심을 따라 토치가 위빙할 경우 양끝단 전류차 ΔI 는 '0'이어야 한다. 그러나 아크센서 모델에서 보면 어느 정도의 오차를 갖고 있는데, 이것도 앞서 말한 불규칙한 인자들과 실험오차등의 영향인 것으로 사료된다. 이러한 불규칙한 인자들의 영향을 줄이기 위해 필터를 통과한 신호를 디지털필터(digital filter)의 효과를 가진 이동평균법(moving average method)을 적용해서 요동이 심한 용접전류를 평활하게 하였다. 이 때 적용한 이동평균식은 다음과 같다⁸⁾.

$$\bar{I}(i) = \sigma \bar{I}(i-1) + (1-\sigma) I(i) \quad (1)$$

여기서,

- $\bar{I}(i)$: 평균전류값(new averaged value)
- $\bar{I}(i-1)$: 전 평균전류값(old averaged value)
- $I(i)$: 필터를 통과한 전류값(new filtered value)
- σ : 가중치(weighting factor)

Table 1은 필터를 통과한 신호와 이동평균법을 적용한 신호를 이용하여 구한 ΔI 와 용접선-위빙중심간 거리의 관계를 아래와 같이 최소자승법을 이용한 회귀직선식으로 나타낼 때 각 비례계수(A)와 절편값(B)을 나타낸다.

$$\Delta I = A \times D + B \quad (2)$$

여기서,

D : 위빙중심선과 용접선간 거리(offset distance), mm

Table 2는 위에서 구한 실험식에 대해 각 데이터들이 나타내는 분산의 정도를 알아보기 위해 최소자승오차를 구하여 나타낸 것이다.

Table 1, 2에서 보듯이 가중치의 감소에 따라 실험식의 비례계수는 증가하고 최소자승오차는 감소하는 것을 알 수 있으며, 용접전류와 전압이 증가할수록 최소자승오차는 증가하였고 비례계수는 감소

하다가 증가하는 비선형적인 관계를 나타내었다. 그리고 240A, 33V의 조건에서 실험식의 비례계수가 가장 큰 것으로 나타나 용접공정에서 토치위빙 중심변화에 대한 위빙 양단의 전류차가 가장 민감한 반응을 보이는 것으로 나타났다.

3. 아크센서모델을 이용한 용접선추적 실험

3.1 용접선 추적 알고리즘

용접선 중심에 대한 위빙중심의 오차가 발생했을 때 이 오차를 제거하여 용접선을 추적해 나가는 과정은 대별하여 적응위빙방식과 고정위빙방식의 두 가지 방법이 사용되고 있다.²⁾ 적응위빙방식은 용접부에 대한 용접토치의 높이(팁-모재간 거리)를 일정하게 유지시키면서 위빙하다가 일정높이(거리)이상되면 위빙방향을 변경하는 방식이며⁹⁾, 고정위빙방식은 주어진 위빙조건에서 위빙 양단의 전류차에 따른 토치의 위치를 보상하는 방식이다.¹⁰⁾ 본 연구에서는 위빙 양단의 전류차를 이용하므로 고정위빙방식을 적용할 수 있으며, 토치위치를 보상하는 방법은 다음과 같다.¹⁰⁾ X-Y table에서 용접시 위빙조건은 위빙시간 T_w 를 일정하게 고정시키고 위빙속도 V_w 를 변화시켜 위빙폭 W 를 조절하도록 하였다.

$$W = V_w \times T_w \quad (3)$$

Table 1 Result of arc sensor model according to signal processing methods

welding condition		filtered signal		filtered & averaged signal							
cur. vol.				weighting factor(σ)							
				0.8		0.7		0.6		0.5	
A	B	A	B	A	B	A	B	A	B		
200A	30V	5.18	1.85	4.31	4.21	4.72	3.24	4.93	2.71	5.03	2.41
220A	32V	4.24	2.00	3.55	3.25	3.85	3.68	4.01	2.39	4.10	2.23
240A	33V	5.42	-0.57	4.72	1.42	5.06	0.46	5.28	-0.03	5.38	-0.28

Table 2 Least square errors of arc sensor model

welding condition		filtered signal	filtered & averaged signal			
cur. vol.			weighting factor(σ)			
			0.8	0.7	0.6	0.5
200 A	30 V	133.97	125.12	112.58	112.74	116.88
220 A	32 V	183.39	182.82	182.05	183.68	183.68
240 A	33 V	195.66	161.53	170.17	176.71	180.25

그러나 토치의 위빙중심이 용접선에서 벗어났을 경우 위빙중심은 위빙폭을 변화시키므로써 조절된다. 즉, 용접선중심에서 벗어난 정도 편차 D를 이용해 위빙속도를 변화시키므로써 수정할 수 있다. 이때 수정해야 할 위빙폭을 W', 위빙속도를 Vw'라 하면 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$W' = W + D \tag{4}$$

$$W' = Vw' \times Tw \tag{5}$$

그런데 여기서 편차 D는 앞서 실험한 아크센서 모델의 회귀직선식(식2)으로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D = (\Delta I - B) / A \tag{6}$$

앞 식들을 이용해 정리하면 토치위치의 보정을 위한 위빙속도는 다음과 같다.

$$Vw' = (W + (\Delta I - B) / A) / Tw \tag{7}$$

3.2 용접선 추적결과

용접선 추적실험을 모델링에서 적용한 3가지 용접조건에 대해 수행하였으며 이때 용접선을 중심선에서 5°의 오프셋각도를 가지게 하였다. Fig.4는 아크센서모델과 제어알고리즘을 이용해 필터를 통과한 신호에 대해 각조건에서 2번씩 용접선 추적실험(exp. 1, exp.2)을 한 결과를 나타낸다. 모델을 위한 데이터의 분산이 큼에도 불구하고 용접선 추적성능은 비교적 양호한 것으로 나타났다. 용접초기 부분에서 오차가 큰 경우는 아크 시작점 부근에서 용접전류가 불안했던 것이 원인으로 사료된다.

Fig.5는 240A, 33V조건에서 이동평균법을 적용했을 경우 최소자승오차가 가장 작은 것(Fig.5(a))과 실험식의 비례계수(A)가 가장 큰 것(Fig.5(b))에 대해 실험한 결과를 나타낸다. 이것으로 보아 용접선 추적성능에 영향을 미치는 인자로는 모델의 최소자승오차보다는 실험식의 비례계수(A)에 더 큰 영향을 받는다고 볼 수 있다. 이는 이동평균법을 적용했을 때의 가장 큰 문제점인 시간지연(time delay)으로 인해 위빙 양 끝단의 정확한 전류값을 나타낼 수 없는 것이

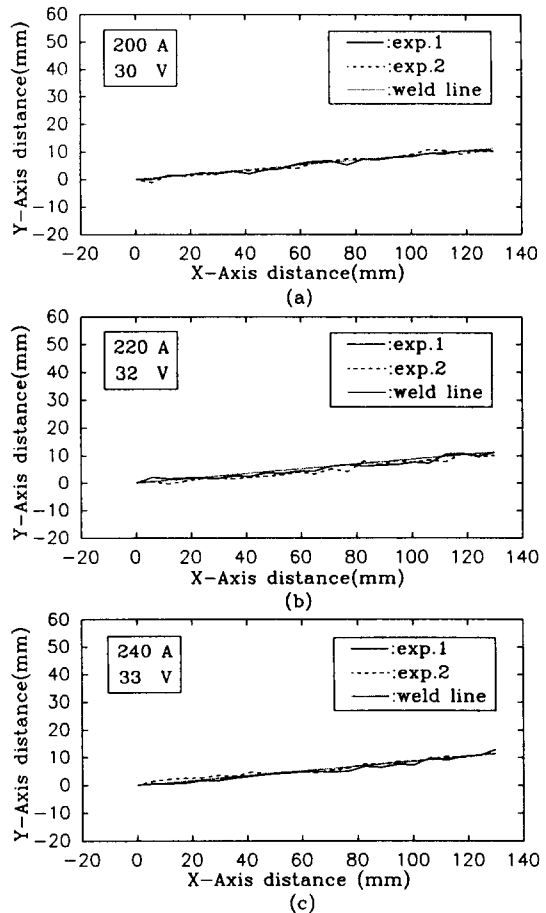


Fig. 4 Controlled trace of torch weaving center by using the model of filtered signal

원인으로 생각된다. 반복적인 실험결과를 통하여 해당 모델은 주어진 용접조건에 대하여 양호한 추적성능을 얻을 수 있으나, 변화된 용접조건에 대해서는 추적성능을 보장하기 어렵다는 것을 알 수 있었다. 따라서 실용화에 접근하기 위한 용접선추적용 아크센서시스템을 구축하기 위해서는 보다 넓은 용접조건에 대해서 용접선 추적성능이 양호한 제어를 설계하는 것이 기대된다.

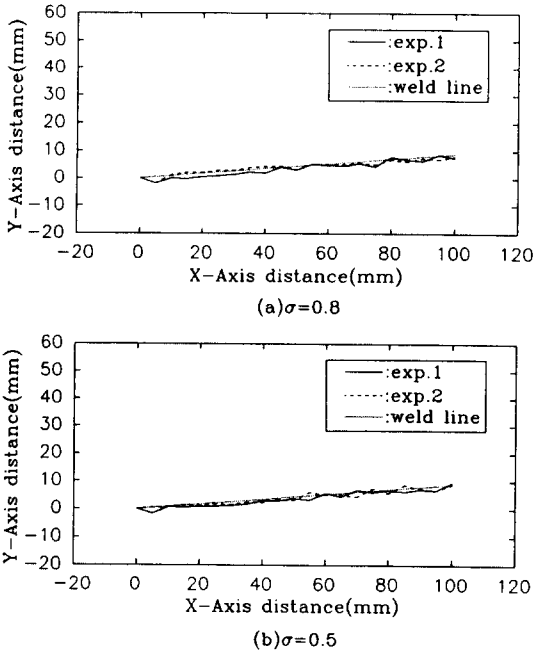


Fig. 5 Controlled trace of torch weaving center by using the model of filtered-averaged signal at 240A, 33 V

4. 퍼지제어를 이용한 용접선 추적

4.1 퍼지제어기의 설계

퍼지제어기는 시스템의 특성이 복잡하여 기존의 정량적인 방법으로는 해석할 수 없거나, 얻어지는 정보가 정성적이고 부정확하거나, 불확실한 경우에 기존 제어기들보다 우수한 제어 결과를 나타내는 것으로 알려져있다. 따라서 용접공정과 같이 해석이 어려운 변수들이 많은 경우에 적용하면 더욱 좋은 결과를 기대할 수 있다. 여기에서는 아크센서모델만을 이용한 용접선 추적에 있어 용접조건에 따라 아크센서의 모델을 바꾸어 주어야 하는 어려움이 있기 때문에 하나의 퍼지제어기로써 다조건용 용접조건에 적용이 가능하고 설계자의 경험과 지식을 이용할 수 있는 퍼지제어기(fuzzy controller)를 설계하였다. 아크센서모델을 이용한 용접선 추적이 일종의 비례제어의 기능을 한다고 보았을 때, 측정 아크전류가 외란에 의한 신호이기 때문에 순간적인 전류의 변동과

이로인한 용접선 추적에 있어서의 큰 오차를 극복하기 위해 적분제어의 기능을 추가하는 것이 타당하리라 생각된다. 이러한 이유로 인해 본 연구에서는 퍼지-비례적분제어(fuzzy proportional & integral control)기를 설계하였다. 일반적인 비례적분제어 시스템에서 제어입력(u)의 결정은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$u = K_p \cdot \Delta I + K_i \cdot \Sigma \Delta I \quad (8)$$

여기서 K_p 와 K_i 는 각각 비례, 적분제어 계수이다. 이와 마찬가지로 퍼지-비례적분제어를 하기 위해 조건부 변수로 위빙 양 끝단의 전류차($e = \Delta I$)와 이 전류차의 적분($s = \Sigma \Delta I$)을 이용하였다. 여기서 적분제어기의 효과를 높이기 위해 오차의 적분은 이전 4개 용접선 오차의 합만을 이용하였다. 아크센서의 모델을 이용한 용접선 추적결과를 기초로 하여 오차의 범위는 +25A - -25A로 하였으며, 오차의 적분의 범위는 +40A - -40A로 하였다. 그리고 토치가 용접선 중심에서 벗어난 거리(D)를 나타내는 결론부 변수(u)의 범위는 +5mm - -5mm로 하였다. 이렇게 조건부와 결론부 변수가 결정되면 실제 입력, 출력 값이 퍼지소속함수(fuzzy subset)의 대표값에 대응되도록 퍼지화와 비퍼지화를 하기위해 상수(scaling factor)를 곱해야 한다.

$$\begin{aligned} E &= Ge \cdot e \\ S &= Gs \cdot s \\ u &= Gu \cdot U \end{aligned} \quad (9)$$

여기서,

- E : e의 퍼지함수
- S : s의 퍼지함수
- U : u의 퍼지함수

소속함수는 오차와 오차의 적분에 대한 조건부 변수의 등급을 각각 11개와 7개의 언어적 집합으로 정의하여 적분제어부분보다 비례제어부분에 비중을 많이 두었다. 또한 출력을 미세하게 제어하기 위해 결론부를 11개의 언어적 집합으로 정의하였다.

$$\begin{aligned} T_e &= \{PVB, PB, PM, PS, PVS, ZO, NVS, NS, NM, NB, NVB\} \\ T_s &= \{PB, PM, PS, ZO, NS, NM, NB\} \end{aligned} \quad (10)$$

$T_U = \{PVB, PB, PM, PS, PVS, ZO, NVS, NS, NM, NB, NVB\}$

- PVB : Positive Very Big
- P B : Positive Big
- P M : Positive Medium
- P S : Positive Small
- PVS : Positive Very Small
- Z O : Zero
- NVS : Negative Very Small
- N S : Negative Small
- N M : Negative Medium
- N B : Negative Big
- NVB : Negative Very Big

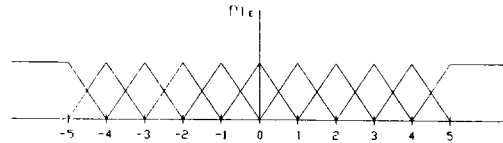
정해진 소속함수는 퍼지추론시 수식계산을 쉽게 하기 위해서 삼각형 형태로 Fig.6 과 같이 설계하였다.

1) 본 퍼지시스템은 2입력 1출력 시스템이며, 이 시스템의 입출력 관계를 나타내는 것이 제어규칙(rule base)이다. 본 연구에서 제어규칙은 넓은 범위의 용접조건에서 양호한 추적성능을 얻을 수 있도록 반복적인 실험 결과로부터 시행착오에 의해 설계되었으며, Table 3에 나타내었다.

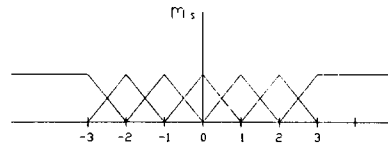
추론과정은 맨다니 (Mandani)의 최소연산법(minimum operation)을 이용하였으며 만약 다음과 같이 2개의 제어규칙이 존재하면,

- R1 : if E is ZO and S is NS then U is PVS
- R2 : if E is NVS and S is NM then U is PM

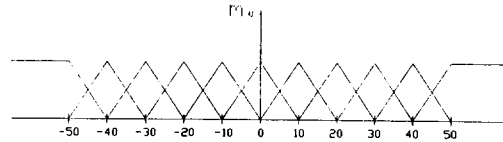
규칙의 적합도는 다음과 같다.



(a) Membership function of linguistic values of E



(b) Membership function of linguistic values of S



(c) Membership function of linguistic values of U

Fig. 6 Fuzzy membership function for each linguistic fuzzy set value

$$\omega_1 = ZO(E) \wedge NS(S) \tag{11}$$

$$\omega_2 = NVS(E) \wedge NM(S)$$

R1, R2에 의한 추론 결과는 다음과 같다.

$$PVS' = \omega_1 \wedge PVS(U) \tag{12}$$

$$PM' = \omega_2 \wedge PM(U)$$

비퍼지화 과정에는 무게중심법, 최대평균법, 중앙값등이 있으며 여기에서는 무게중심법을 이용하였다.

$$U = \frac{U_1 PVS' + U_2 PM'}{PVS' + PM'} \tag{13}$$

Table 3 Rule base for fuzzy control

S \ E	E										
	NVB	NB	NM	NS	NVS	ZO	PVS	PS	PM	PB	PVB
NB	PVB	PVB	PVB	PVB	PB	PM	PS	PVS	ZO	NVS	NS
NM	PVB	PVB	PVB	PB	PM	PS	PVS	ZO	NVS	NS	NM
NS	PVB	PVB	PB	PM	PS	PVS	ZO	NVS	NS	NM	NB
ZO	PVB	PB	PM	PS	PVS	ZO	NVS	NS	NM	NB	NVB
PS	PB	PM	PS	PVS	ZO	NVS	NS	NM	NB	NVB	NVB
PM	PM	PS	PVS	ZO	NVS	NS	NM	NB	NVB	NVB	NVB
PB	PS	PVS	ZO	NVS	NS	NM	NB	NVB	NVB	NVB	NVB

U1, U2는 추론값의 위치이다. 이러한 추론과정의 예를 Fig.7에 나타내었다.¹²⁾

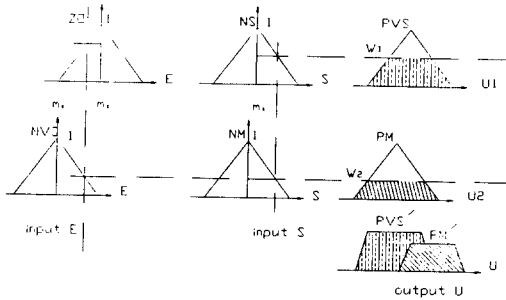


Fig. 7 Diagrammatic representation of fuzzy reasoning

4.2 퍼지제어 파라미터의 설정

앞서 기본설계된 퍼지제어기에서 각종 제어 파라미터의 설정을 위하여 중심오차가 5°인 용접선에 대해 추적실험을 하였다. 퍼지-비례적분제어기의 파라미터 중 G_e 와 G_s 는 각각 식(8)에 나타난 일반적인 비례적분제어기의 비례제어계수(K_p)와 적분제어계수(K_i)에 해당하는 영향력을 나타낸다. 따라서 용접선 추적결과는 이들 파라미터의 영향을 받게되며, 퍼지제어기에 적합한 각각의 요소(scaling factor)를 찾기위해 먼저 오차항(E)에 대한 퍼지화 상수(G_e)를 변화시켜 보았다. Fig.8은 240A, 33V의 조건에 대한 퍼지 비례제어(fuzzy proportional control)에서 G_e 를 각각 0.1, 0.2, 0.3으로 한 경우인데 G_e 값이 0.3일 때 과도한 비례제어효과에 의한 결과로 심한 요동이 나타나는 것을 알 수 있었다. G_e 값이 0.1, 0.2에서 안정된 결과를 얻을 수 있었으며 0.2일 때 추적성능이 보다 양호하게 나타나 가장 적합한 G_e 값이라는 것을 알 수 있다.

오차의 적분항(S)에 대한 퍼지화 상수(G_s)를 역시 240A, 33V의 조건에서 0.02, 0.05로 변화시켜 가면서 용접선 추적성능을 평가해 보았다(Fig.9). 적분제어 효과는 제어초기에 충분히 기여하지 못하는 것을 감안하면 G_s 값이 0.02일 때 추적성능이 가장 양호한 것으로 판단되므로 본 시스템의 적분항에 대한 퍼지화 상수로 결정하였다.

Fig.10은 $G_e=0.2$, $G_s=0.02$ 인 경우에 대해 비퍼지화 상수인 G_u 값을 0.08와 0.09로 하였을 때 해당 용접 조건에 대해 용접선 추적성능을 알아본 결과이다. 이

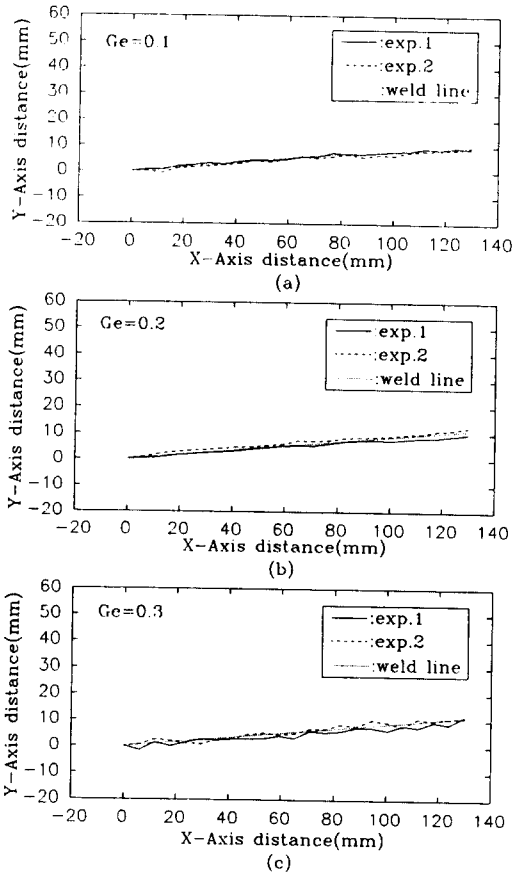


Fig. 8 Tracking ability according to G_e at 240A, 33V in fuzzy P-control

결과 G_u 값이 0.09일 때가 추적성능이 양호한 것으로 나타나 본 퍼지시스템에 적합한 비퍼지화 상수로 설정하였다.

4.3 퍼지제어를 이용한 용접선 추적결과

설계된 퍼지제어기의 용접선추적성능을 확인하기 위하여 여러 용접조건을 적용해 보았다. 이때 제어 파라미터 G_e , G_s , G_u 값은 앞에서 설정된 0.2, 0.02, 0.09를 각각 적용하였다. Fig.11의 (a)와 (b)는 각각 200A, 30V, 220A, 32V의 용접조건에 대한 추적결과를 나타낸다. 그림에서와 같이 본 퍼지제어기는 실험한 세 가지 용접조건에 대해서 모두 양호한 용접선 추적성능을 나타내었다.

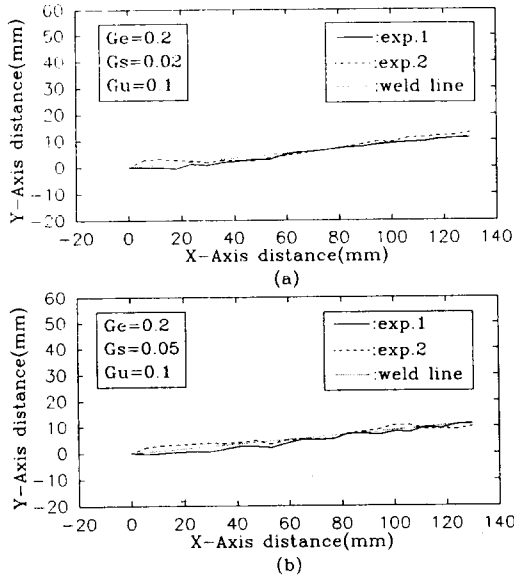


Fig. 9 Tracking ability according to Gs at 240A, 33V in fuzzy control

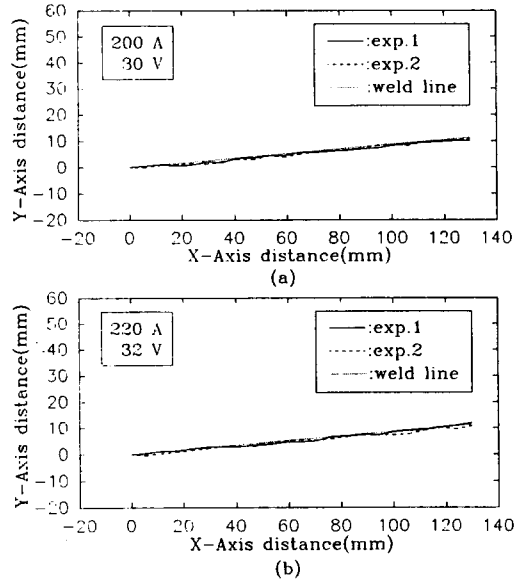


Fig. 11 Tracking ability by using fuzzy control at various welding conditions

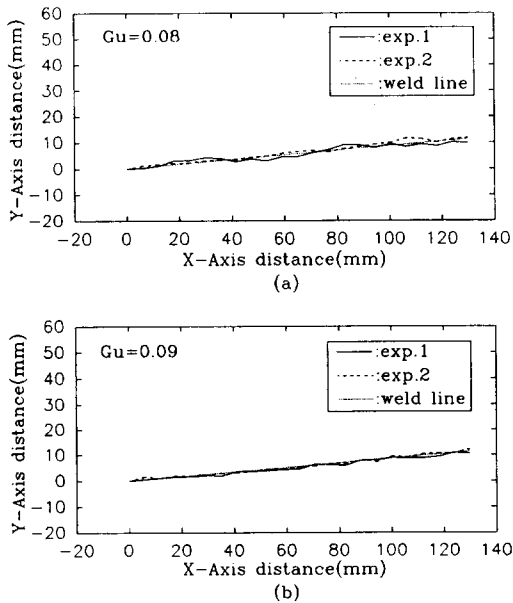


Fig. 10 Tracking ability according to Gu at 240A, 33V in fuzzy control

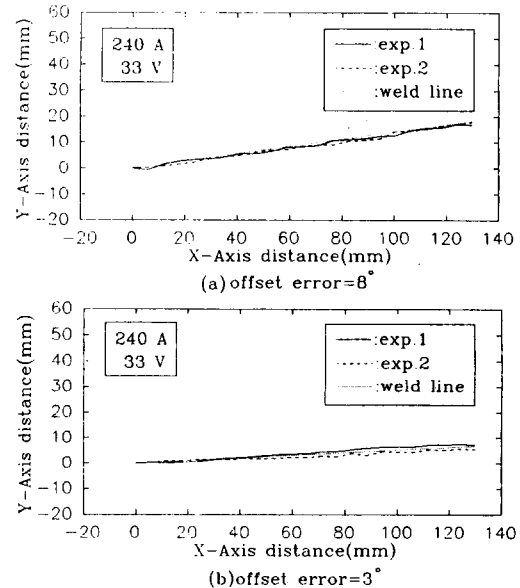


Fig. 12 Tracking ability by using fuzzy control at various angular offset errors of weld line

계된 퍼지제어기가 임의의 용접선 오차에 대해서도 용접선 추적이 가능한 것을 알 수 있다. 실험결과로부터 아크센서의 모델이 용접조건에 따라 비선형적인 변화를 나타내는데 따른 제어기설계의 문제점이 퍼지제어를 적용하므로써 극복될 수 있음을 알 수 있다. 반면에 퍼지제어기에서도 각종 파라미터를 구하기 위해 많은 실험이 요구되었다. 그러나 모델링에서 실험결과와 분산치가 크게 나타나므로 이를 보상하기 위한 보상제어기의 구축이 모델을 이용한 용접선 추적 시스템에서 요구됨을 알 수 있으며, 이러한 점을 감안하면 퍼지제어기의 설계가 보다 경제적인 것으로 판단된다. 따라서 정밀한 모델링이 어려운 아크용접 공정에서 퍼지제어기에 의한 용접선 추적용 아크센서 시스템은 효과적인 방안이 될 수 있으며, 실험결과로부터 보다 넓은 용접조건에 대해서 용접선 추적 성능이 양호하게 나타나는 것을 볼 수 있었다.

6. 결 론

본 연구에서는 위빙중심선과 용접선간의 거리에 따른 용접전류의 변화량을 필터를 통과한 신호와 이 신호에 이동평균법을 적용한 신호에 대해 모델링 하였으며, 이것을 용접선 추적실험에 적용하여 양호한 용접선 추적성능을 얻을 수 있었다. 특히, 필터를 통과한 신호에 의한 모델과 이동평균법을 적용한 모델에 대해 추적성능을 비교해 보면 신호의 변동이 심한 필터통과신호(filtered signal)에 대해 추적성능이 나은 것으로 나타나 아크센서 모델의 비례계수가 영향을 크게 미친다는 것을 알 수 있었다. 이는 용접선 추적용 아크센서 시스템의 구축에 있어서 다수의 정확한 모델이 필요하다는 것을 의미한다. 따라서 여러 용접 조건에 동시 적용 가능한 퍼지제어기를 구축하였다. 아크센서모델을 이용한 용접선 추적 결과를 기초로 퍼지제어기를 설계하였으며, 퍼지제어기의 각 요소를 변화시켜 가면서 용접선 추적 성능을 평가해 보았다. 그 결과 퍼지화 상수인 G_e 와 G_s , 비퍼지화 상수인 G_u 가 각각 0.2, 0.02, 0.09일 때 가장 추적 성능이 좋은 것으로 나타났다. 그리고 이렇게 설계된 퍼지시스템을 용접선 중심 오차가 $8'$ 와 $3'$ 인 경우에 대해 적용해 보았을 때 상당히 양호한 추적성능을 나타내었으며 본 퍼지제어시스템이 여러가지의 용접조건에 대해서도 용접선 추적이 가능함을 확인할 수 있었다.

후 기

이 논문은 1994년도 영남대학교 학술연구비 지원에 의해 연구되었음.

참 고 문 헌

- (1) T. Araya and S. Saikawa : Recent activities on sensing and adaptive control of arc welding , 3rd Int'l Conf. on Trends in welding Research, Gatin-burg, USA, (1992), PP. 833-842
- (2) 김재웅, 나석주 : 아크센서를 이용한 용접선 추적장치, 대한용접학회지, 제6권, 제4호, (1988), pp. 1-6
- (3) J.W. Kim and S.J. Na : A Study on Prediction of Welding Current in Gas Metal Arc Welding-part1 : Modelling of Welding Current in Response to Change of Tip-to-Workpiece Distance, Procd. IMechE, Vol.205, (1991), pp. 59-63
- (4) J. W. Kim and S.J. Na : A Study on Prediction of Welding Current in Gas Metal Arc Welding-part2 : Experimental Modelling of Relationship between Welding Current and Tip-to-Workpiece Distance and Its Application to Weld Seam Tracking System, Procd. IMechE, Vol.205, (1991), pp. 64-69
- (5) E. Halmoy : Wire Melting Rate, Droplet, Temperature and Effective Anode Melting Potential, Int'l Conf. on Arc Physics and Weld Pool Behaviour, London, (1979), pp. 49-57
- (6) G. E. Cook : Robotic Arc Welding-Research in Sensory Feedback Control, IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol.IE-30, No.3 (1983), PP. 252-268
- (7) I. Masmoto, M. Kutsuna and M. Abraham : Metal Transfer and Spatter Loss in Double Gas Shielded Metal Arc Welding(Report 1), Trans.of JWS, Vol.19, No.2, (1988), pp. 38-44
- (8) G. E. Cook, A. M. Wells, H. M. Floyd, and R. L. Mckeown : Analyzing Arc Welding Signals with a Microcomputer, Conf. on Recent IEEE

- Industry Applications, (1982), pp.1282-1288
- (9) H. Nomura, Y. Sugitani, and N. Tamaoki : Automatic Real-time Bead Height Control with Arc Sensor(Report2), Trans. of JWS, Vol.18, No.2, (1987), pp. 43-50
- (10) J. W. Kim and S.J. Na : A Study on Arc Sensor Algorithm for Weld Seam Tracking in Gas Metal Arc Welding of Butt Joints, Procd. IMechE, Vol. 205, (1991), pp. 247-255
- (11) 이광형, 오길록 : 퍼지이론 및 응용 II 권 : 응용, 홍릉과학출판사, (1991), pp. 5.1-5.91
- (12) C. C. Lee : Fuzzy Logic in Control Systems : Fuzzy Logic Controller, Part II, Trans.of IEEE, Vol. 20, (1990), pp. 419-435